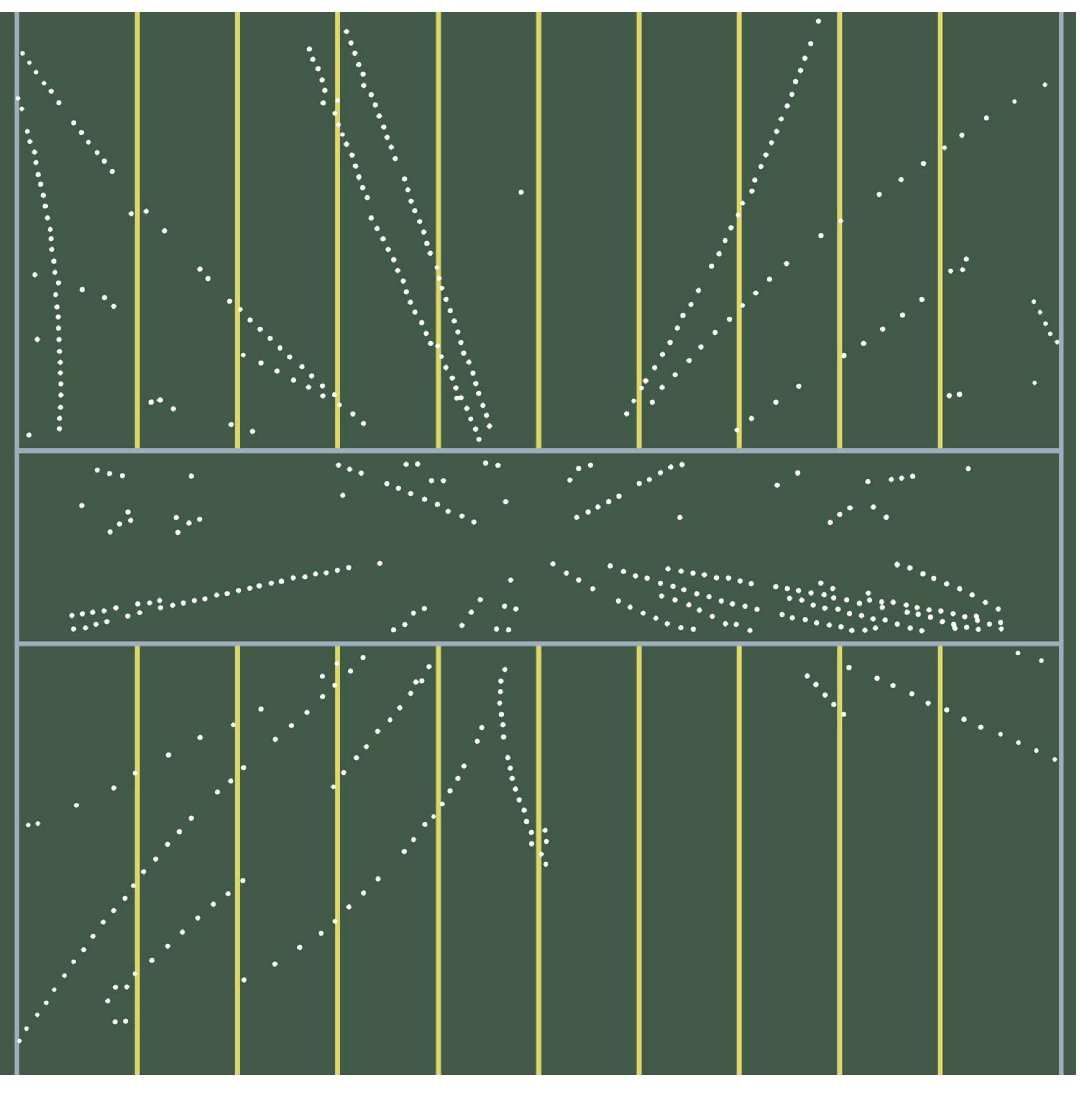
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



COLISION PROTON-ANTIPROTON

Mayo 1982

300 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 68
Mayo 1982

INVESTIGACION Y CIENCIA
Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

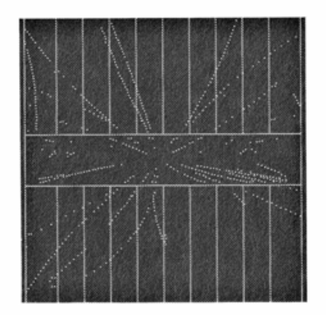
Pedro Pascual: *Búsqueda de bosones vectoriales intermedios*; Montserrat Domingo: *Anillos de la corriente del Golfo*; Antonio Coloma: *Oncogenes*; Carlos Ranninger: *Aplicaciones del láser en la industria*; Manuel Puigcerver: *Supercúmulos y vacíos en la distribución de galaxias*; José María Recio Pascual: *La "visión" infrarroja de las serpientes*; J. M. García de la Mora: *Cocaína*; Luis Bou: *Temas metamágicos*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Ciencia y sociedad

Emilio Gelpí y F. X. Pastor Pàmies

Libros:

Demetrio Díaz, Ramón Margalef, Juan José Acero y Luis Alonso



LA PORTADA

Recoge la ilustración de portada un conjunto de trazas de partículas elementales surgidas de un choque frontal entre un protón y un antiprotón, acelerado uno y otro a gran energía en un dispositivo de colisión de haces que acaba de construirse en la Organización Europea de Investigaciones Nucleares (CERN), con sede en las proximidades de Ginebra. En los restos de semejantes colisiones confían los físicos hallar la prueba que corrobore la hasta ahora postulada existencia de cierta familia de partículas: la de los bosones vectoriales intermedios (véase "Búsqueda de bosones vectoriales intermedios", por David B. Cline, Carlo Rubbia y Simon van der Meer, en este mismo número). El dibujo ilustra una pantalla conectada a un ordenador asociado con un gran detector de partículas que rodea el punto donde se produce la colisión. Los protones entran por la derecha; por la izquierda, se introducen los antiprotones.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 37

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 3.300 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 52 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
340 pesetas
Ejemplar atrasado extraordinario:
440 pesetas

Distribución para España
Distribuciones de Enlace, S. A.
Ausias March, 49, Barcelona-10

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - Barcelona-29

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137, Madrid-30
Tel. 430 84 81
Cataluña:
Lourdes Padrós
Manuel Girona, 61, 2.°, Barcelona-34
Teléfono 204 45 83

Controlado por O.J.D.



PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Ilustración de portada de Gabor Kiss

Página	Fuente
6	Sección Solar del Instituto de Astrofísica de Canarias
8-15	T. Roca Cortés
17	Organización Europea de Investigaciones Nucleares
18-26	Gabor Kiss
27-28	Organización Europea de Investigaciones Nucleares
30-31	Robert H. Evans, Otis B. Brown y James W. Brown
32-38	George V. Kelvin
39	Tom Prentiss
40	George V. Kelvin
45	E. Gelpí y M. Alonso
48-50	F. X. Pastor y M. Alonso
53	Bunji Tagawa
54	G. Steven Martin (*arriba*), Bunji Tagawa (*abajo*)
55-56	Bunji Tagawa
57	Mark C. Willingham y Ira H. Pastan (*arriba*), Larry R. Rohrschneider (*abajo*)
58	Bunji Tagawa
59	J. Michael Bishop (*arriba*), Bunji Tagawa (*abajo*)
60-64	Bunji Tagawa
66	Fiat Auto S.p.A.
68-69	Ian Worpole
70	Avco Everett Research Laboratory, Inc.
71-72	R.T.M. Institute
73	United Technologies Research Center
74	General Motors Corporation
77-78	Laird A. Thompson y Observatorio Nacional Kitt Peak
80-86	Allen Beechel
89	Eric A. Newman
90-92	Tom Prentiss
93	Tom Prentiss (*arriba*), Edward R. Gruberg y Eric A. Newman (*abajo*)
94-98	Tom Prentiss
101	R. F. Bonifield, cortesía del Museo del Indio Americano, Nueva York
102-103	Ilil Arbel
104	Robert Byck, Facultad de Medicina de la Universidad de Yale, y Alan Pooley, del Museo Peabody de la Universidad de Yale
105-109	Ilil Arbel
113-119	Albert E. Miller
121-126	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Pedro IV, 160 - Barcelona-5
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S. A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
Barcelona-13
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

TEODORO ROCA CORTES ("Las oscilaciones solares") enseña astrofísica en la Universidad de La Laguna e investiga en el Instituto de Astrofísica de Canarias. Procede de la Universidad de Barcelona, donde se licenció en 1974 y en cuyo departamento de física de la tierra y del cosmos estuvo trabajando dos años. Obtiene en 1975 una beca para estudiar astrofísica en el mencionado instituto canario. Allí forma parte de la sección solar. Desde 1976 trabaja en estrecha colaboración con el grupo solar del departamento de física de la Universidad de Birmingham. Investigación conjunta que permitirá el anuncio de la existencia de estructura de la oscilación solar de cinco minutos. Se doctoró en 1979 en la Universidad de La Laguna.

DAVID B. CLINE, CARLO RUBBIA y SIMON VAN DER MEER ("Búsqueda de bosones vectoriales intermedios") trabajan en un esfuerzo común por detectar las partículas portadoras de las fuerzas nucleares débiles. Cline divide su tiempo entre la docencia de física en la Universidad de Wisconsin en Madison y la investigación en el Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab). Se formó en las universidades de Kansas y de Wisconsin. Rubbia estudió en Pisa, en cuya universidad explicó física durante el bienio de 1958 y 1959. Pasó a la Universidad de Columbia con una beca y volvió, en 1960, a Italia para hacerse cargo de una cátedra en la Universidad de Roma. Desde 1962 hasta 1970 permaneció en la Organización Europea de Investigaciones Nucleares (CERN). En ese último año lo contrató la Universidad de Harvard. Y ahora compagina la enseñanza allí con el trabajo de investigación en el CERN. Van der Meer se formó en la Universidad de Guelph. Especialista en diseño de aceleradores, ha desempeñado un destacado papel en el desarrollo de los aceleradores de colisión de haces protón-antiprotón.

PETER H. WIEBE ("Anillos de la corriente del Golfo") es científico asociado de la Institución Oceanográfica Woods Hole. Se graduó en 1962 por el Arizona State College; se recibió de doctor en oceanografía biológica (1968) por la Universidad de California en San Diego. En 1968 y 1969 disfrutó de una beca de investigación en la Estación Marina Hopkins de la Universidad de Stanford. Después se trasladó a la Institución Oceanográfica Woods Hole como científico ayudante. Su campo principal de investigación son los factores que afectan al tamaño y a la distribución de poblaciones de animales marinos.

J. MICHAEL BISHOP ("Oncogenes") enseña microbiología en la Universidad de California en San Francisco. Es licenciado en química por el Gettysburg College (1957) y doctor en medicina por la Facultad de Medicina de la Universidad de Harvard (1962). Entre 1964 y 1968 trabajó en el Instituto Nacional de Alergia y Enfermedades Infecciosas, de los Estados Unidos, en el campo de la virología, primero como adscrito y luego como investigador de número. En 1968 se incorporó al claustro de la Universidad de California. Las investigaciones de Bishop, se centran en el tema de su artículo: cómo se incorporan los genes animales de mamífero en los virus y cómo pueden dichos genes inducir la formación de tumores.

ALDO V. LA ROCCA ("Aplicaciones del láser en la industria"), pertenece a la plantilla de Fiat Auto S.p.A. de Turín. Su trabajo se centra en la aplicación de tecnología avanzada a los procesos de fabricación de la compañía. Se licenció en ingeniería mecánica por la Universidad de Nápoles en 1950. En 1951 se trasladó a los Estados Unidos como becario de la Fundación Fulbright para completar su formación en el Instituto Politécnico de Brooklyn. De 1951 a 1955 estudió dinámica de gases en el Laboratorio de Aerodinámica Supersónica del Instituto, doctorándose en mecánica aplicada. En 1955 pasó a la General Electric Company, donde investigó sobre la propulsión de vehículos aeroespaciales. Regresó a Italia en 1972 para trabajar en la Fiat; la mayor parte de su trabajo lo ha realizado en la aplicación industrial de láseres.

STEPHEN A. GREGORY y LAIRD A. THOMPSON ("Supercúmulos y vacíos en la distribución de galaxias") son astrónomos con un interés especial en la estructura y evolución de supercúmulos de galaxias. Gregory cursó su primer ciclo universitario en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign y su doctorado en astronomía lo obtuvo por la Universidad de Arizona. Desde 1973 y 1977 formó parte del cuerpo docente de la Universidad estatal de Nueva York en Oswego. En 1977 pasó a la Universidad de Bowling Green como profesor adjunto de física. Thompson cursó su primer ciclo en astronomía y física por la Universidad de California en Los Angeles. Su título de doctor en astronomía le fue concedido por la Universidad de Arizona en 1974, el mismo año que a Gregory. Tras dos años de estancia en la Universidad de Nebraska, pasó a la de Hawai en Manoa, en cuyo Instituto de Astronomía está ahora.

ERIC A. NEWMAN y PETER H. HARTLINE ("La 'visión' infrarroja de las serpientes") trabajan en el Instituto de Investigación Ocular de la Fundación Retina de Boston. Desde 1978 colaboran en trabajos sobre la percepción infrarroja de las serpientes. Newman se licenció y doctoró en biología por el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Hartline cursó su carrera en el Swarthmore College, doctorándose en neurología por la Universidad de California en San Diego (1969). De 1969 a 1974 fue investigador adjunto de dicha institución. En 1974 pasó a la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign y, en 1977, al Instituto de Investigación Ocular.

CRAIG VAN DYKE y ROBERT BYCK ("Cocaína") son psiquiatras preocupados por las drogas y su abuso. Van Dyke profesa en la Facultad de Medicina de la Universidad de California en San Francisco, además de coordinar el departamento de asistencia psiquiátrica del Hospital para Veteranos de la Administración de San Francisco. Se licenció en oceanografía por la Universidad de Washington en 1963 y doctoró en medicina, por la misma institución, en 1969. Cumplido su internado como médico de hospital, pasó dos años y medio en la Marina. En 1971 se trasladó a la Facultad de Medicina de la Universidad de Yale, donde trabajó como residente psiquiátrico y fue luego miembro del claustro. En 1980 pasó a formar parte de la Facultad de la Universidad de California. Byck es profesor de psiquiatría y farmacología en la Facultad de Medicina de Yale. Se licenció en psicología por la Universidad de Pennsylvania, donde también se doctoró en medicina. De 1960 a 1962 trabajó como adscrito al Instituto Nacional de la Salud Mental. De 1962 a 1969 perteneció al claustro de la Facultad de Medicina de la Universidad Yeshiva; en 1969 pasó a Yale. Byck se interesa por las drogas que se emplean en el tratamiento de los trastornos psiquiátricos y los efectos de la congelación en los tejidos del sistema nervioso central de los mamíferos.

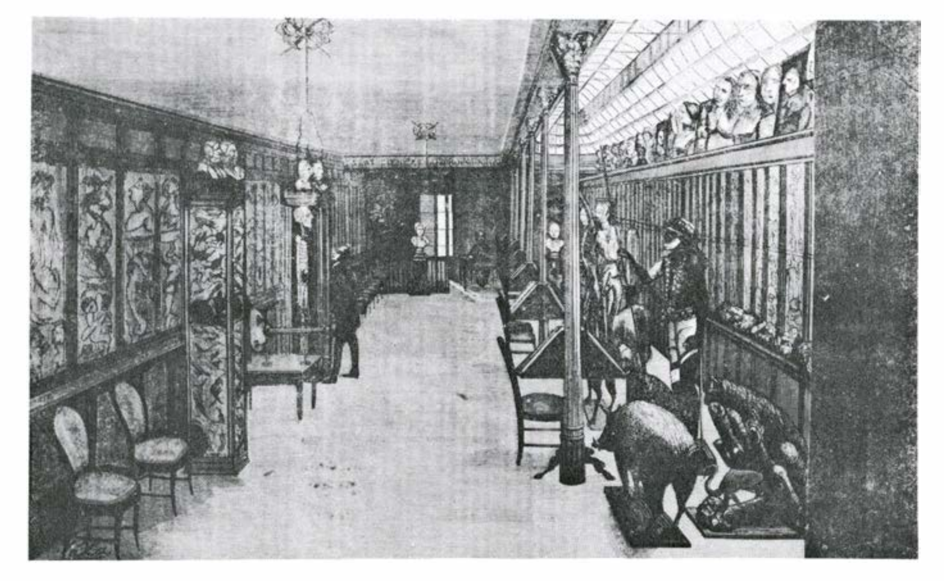
Hace...

José M.ª López Piñero

... cien años

Falleció en Madrid Pedro González de Velasco, figura clave de la renovación de las ciencias morfológicas en la España del siglo XIX. Había nacido el año 1815 en la localidad segoviana de Valseca de Boones, en el seno de una familia muy humilde de labradores.

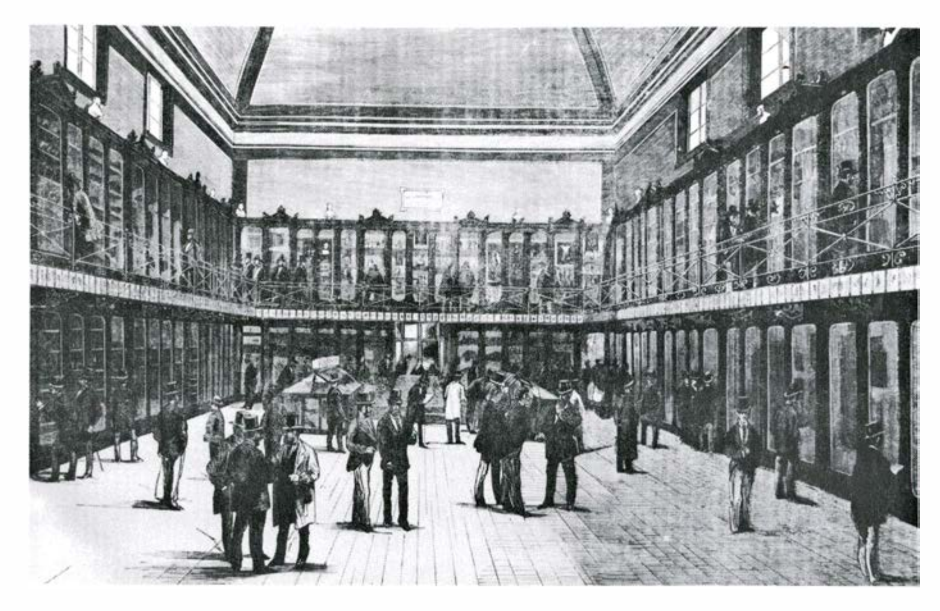
Siendo casi un niño, González de Velasco fue forzado a seguir la carrera eclesiástica, que inició en el seminario diocesano de Segovia y continuó en los conventos de carmelitas descalzos de la misma Segovia y de Valladolid. Exclaustrado en 1833, sirvió luego como cabo furriel en el ejército liberal durante seis años. En 1839 fijó su residencia en Madrid, trabajando al principio como criado en diferentes casas aristocráticas. Estudió después la carrera de cirujano de tercera clase, que terminó en 1842, fecha en la que consiguió asimismo una plaza de practicante en el Hospital Militar de Madrid. En 1843 se matriculó en la Facultad de Medicina y, todavía de estudiante, organizó un "repaso" de anatomía que alcanzó gran prestigio y le proporcionó notables ingresos. Al mismo tiempo, montó una pequeña sociedad dedicada a la fabricación de vaciados y de preparaciones anatómicas. A los pocos años de obtener el título de médico, González de Velasco se convirtió en una auténtica celebridad quirúrgica. Cuando triunfó la revolución de 1868, era quizás el cirujano más afamado de toda España y había reunido una cuantiosa fortuna. Su trayectoria científica y su liberalismo radical le llevaron a concebir el proyecto de invertirla en crear un museo anatómico y una escuela libre de medicina a la altura de las mejores existentes en Europa, con la intención de superar el atraso de las instituciones académicas españolas. Criticó, en concreto, la enseñanza anatómica y fisiológica que se daba en la Facultad de Medicina de Madrid en los siguientes términos: "La docencia debe estar basada en un plan fijo preconcebido, que imprima carácter a la enseñanza que en la escuela se da. ¿Lo tiene por ventura? ¿Cuál es? ¿Hipocrático? ¿Materialista? ¿Organicista? ¿Quienes apoyan y sustentan sus ideas? ¿Tiene la escuela los medios de instrucción que debe exigir el discípulo y reclama nuestra época actual? Para la enseñanza de la anatomía ¿cuenta con los elementos que reclama una facultad donde pasa de cuatro mil el número de alumnos ávidos de saber y de adquirir conocimientos anatómicos prácticos sólidos, en la histología descriptiva, patológica y quirúrgica, en las operaciones y maniobras que estos estudios y conocimientos reclaman hoy? ¿Hay suficiente número de cadáveres? ¿Por qué entonces no hay muchísimos días sala de disección? ¿Por qué los jefes del departamento de anatomía práctica y de la escuela no los proporcionan de los hospitales que existen bajo la jurisdicción oficial? ¿Tienen las cátedras prácticas de anatomía y operaciones la dotación cumplida para demostrar satisfactoriamente las lecciones, las operaciones y que éstas sean ejecutadas prácticamente por los discípulos después de ejecutadas por los maestros? ¿Cómo estamos de experimentos fisiológicos? ¿Qué ensayos se hacen en animales para aquilatar las funciones de sistemas y aparatos, cuya funcionalidad se puede demostrar por estos medios? ¿Se le enseña al alumno a conocer profundamente la portentosa máquina de nuestra organización? Tampoco: pocos, muy afortunados alumnos tienen esa suerte. Los demás no pueden adquirir verdadera instrucción anatomofisiológica, por más que los maestros agucen las palabras, pues éstas, sin demostraciones prácticas, tangibles, a lo sumo sirven para revelar la instrucción y buenos deseos del profesorado, que muchas veces puede no estar muy acertado, por no poder demostrar lo que teóricamente concibe y elucubra, en lo ideal y especulativo, en lo subjetivo, pero no en lo objetivo y tangible".



Instalación de las colecciones de González de Velasco en su domicilio privado, antes de que fueran trasladadas al Museo Antropológico

En 1842, González de Velasco había comenzado a reunir en su casa preparaciones de anatomía humana normal y patológica, colección que fue ampliando después con piezas de anatomía comparada, historia natural, antropología física y etnología. Por otra parte, desde 1854 realizó nueve viajes en los que estudió los museos anatómicos de Francia, Italia, Inglaterra, Alemania, Austria, Holanda y Bélgica. La completa libertad de enseñanza existente en España durante el período revolucionario pesó a favor de la realización del proyecto de modo decisivo, iniciándose a su costa la construcción de un edificio y la instalación en él de un "Museo Antropológico" y de una "Escuela Práctica Libre de Medicina y Cirugía". Poco antes de que comenzase a funcionar, expuso así sus objetivos: "Resumo en una sola palabra la innovación, planteamiento, estructura y

tecnicismo que pienso introducir en mi Museo para reformar la enseñanza de la ciencia a que toda mi vida he estado consagrado: la *experimentación*. El anfiteatro, los laboratorios y las demostraciones objetivas constituirán, de preferencia a las explicaciones orales, el distintivo especial de esta escuela... No solamente se estudiará el organismo muerto con la ayuda de la disección, del microscopio y la análisis histoquímica, sino también en su más alto grado de verdad, en sus funciones y su actividad con el establecimiento de una fisiología experimental, que arranque desde la composición y cambios moleculares de los líquidos y de los elementos anatómicos en estado normal, hasta los que unos y otros experimentan en las distintas enfermedades del organismo". Aunque González de Velasco no había ocultado sus simpatías por el régimen republicano, la institución fue inaugurada por Alfonso XII en abril de 1875. Desde entonces, pareció cambiar radicalmente su suerte. Administradores y contratistas poco honestos lo dejaron sin fortuna y, además, sus ingresos profesionales descendieron drásticamente. Los últimos años de su vida fueron realmente patéticos. Acosado por los acreedores, hostigado por el mundo académico oficial de la Restauración e ignorado por las nuevas generaciones científicas, asistió impotente al hundimiento total de su obra. Acabó de trastornarlo la muerte de su hija, cuyo cadáver, que embalsamó personalmente, conservó durante mucho tiempo en su domicilio, simulando una vida inexistente. Poco después del fallecimiento del propio González de Velasco, el edificio del Museo con todas sus instalaciones fue adquirido por el Estado.


El salón central del Museo Antropológico de González de Velasco, en la época de su inauguración

El Museo tenía nutridas colecciones de materiales relacionados con la botánica, la zoología, la paleontología, la anatomía humana normal y patológica, la etnología y la historia, no siempre seleccionados con criterios rigurosos. Sin embargo, con todas sus limitaciones, la labor de González de Velasco contribuyó de manera importante a la introducción en España de varias disciplinas. Fundó la primera Sociedad Española de Antropología (1865), colaboró en los estudios de Pierre Paul Broca en el País Vasco y reunió en su Museo una notable colección de cráneos con fines étnicos. También creó una Sociedad Anatómica (1873), que estimuló la realización de trabajos morfológicos macro y microscópicos, normales y patológicos. Su Escuela Práctica Libre de Medicina y Cirugía contaba con una sala de disección, un laboratorio químico y "gabinete micrográfico". Tenía entre sus profesores a figuras de vanguardia de la indagación microscópica, como el cirujano Federico Rubio, el otorrinolaringólogo Rafael Ariza y el neuropsiquiatra Luis Simarro, y a otras destacadas personalidades científicas, entre ellas el geólogo Juan Vilanova Piera, el zoólogo Joaquín González Hidalgo y el médico Carlos María Cortezo. Además de las asignaturas oficiales, impartía enseñanza de histología e histoquímica, de paleontología, de fisiología experimental y comparada, de bibliografía médica y de las principales especialidades médicas y quirúrgicas.

Las numerosas publicaciones de González de Velasco tratan de temas muy diversos. Entre sus libros destaca un *Atlas de partos* (1852) que publicó en colaboración con José Díaz Benito, así como varias memòrias acerca de sus viajes científicos al extranjero, en especial la dedicada al *Museo de Dupuytren de París* (1854). Publicó también artículos sobre anatomía normal y patológica, cirugía y obstetricia, enseñanza médica y problemas profesionales. Fundó asimismo la revista *El Anfiteatro Anatómico Español* (1873-1880), una de las de mayor altura científica del periodismo español de la época. A pesar de su título, no fue una publicación consagrada a los estudios morfológicos, sino abierta a todos los temas médicos.



Cabecera de la revista de González de Velasco

Las oscilaciones solares

La observación de los modos propios de oscilación del Sol nos proporciona información sobre el estado físico de su interior y abre un nuevo campo de investigación: la sismología solar

T. Roca Cortés

Las estrellas son esferas de gas sometidas a altas temperaturas. Cuanto de ellas conocemos lo sabemos a través del estudio de la radiación electromagnética que emiten en todas las frecuencias. Pero no se trata de un camino que nos lleve directamente al interior estelar. Los fotones producidos en el centro de las estrellas son absorbidos y reemitidos muchas veces antes de llegar a la superficie: millones de años tardan en alcanzarla. A lo largo de esos procesos se pierde energía y el fotón que llega hasta nosotros es distinto del que lo originó, y no porta ya información alguna del lugar donde se produjo. Esta es la razón por la cual el interior estelar ha permanecido escondido a la observación. De hecho, el lugar más profundo desde donde nos puede llegar un fotón, sin perder su identidad, es la base de la fotosfera, zona superficial de la estrella. El Sol es una estrella más entre las que pueblan nuestro universo. Sólo fotones producidos en la base de su fotosfera (cuya profundidad es de un 1 por mil de su radio, aproximadamente) llegan hasta la Tierra.

Para describir el estado físico de una estrella cualquiera se construyen modelos que proporcionan valores de la densidad, la temperatura y la presión en función del radio, bajo hipótesis simplificadoras (sobre generación de energía, composición química, opacidad, ecuación de estado, equilibrio térmico y equilibrio hidrostático) que dan la impresión de que, a medida que nos adentramos en la estrella, la física de la misma se torna más sencilla.

La falta de observaciones con las que contrastar los modelos ideados ha contribuido a pasar por alto la pregunta de si las hipótesis bajo las cuales se construyen esos modelos son tan simples como válidas. Los parámetros observables de las estrellas son, en el mejor de los casos: luminosidad, L, radio, R, y masa, M, además del espectro electromagnético, por supuesto. La luminosidad, el radio y la masa son absolutamente insuficientes para determinar sin ambigüedades un modelo estelar; el espectro electromagnético, por su parte, tan sólo da información sobre fenómenos en una zona superficial de la estrella: la atmósfera, o fotosfera.

El espectro solar está bien determinado. Y se posee un conocimiento adecuado de los fenómenos superficiales de granulación, supergranulación, rotación diferencial, manchas solares y otros. Mucho menos se conoce el interior y fenómenos relacionados con él, como la actividad solar. Más aún, la primera vez que se ha intentado comprobar algún aspecto del interior solar, así la generación de energía, por medio de la detección de neutrinos, los astrónomos no se pusieron de acuerdo. Los neutrinos son partículas sin masa, producidos en las reacciones nucleares que transforman el hidrógeno en helio en el interior del Sol, que apenas interaccionan con la materia –no suelen sufrir absorción intermedia– y llegan fácilmente a la Tierra. Las medidas del flujo de neutrinos que nos llega efectuadas por R. Davis, Jr., dan resultados bastante inferiores a los que cabría esperar, si los comparamos con las predicciones de los modelos solares en uso; todavía continúa la disputa sobre si se trata de un fallo en el experimento o son incorrectas las hipótesis efectuadas al calcular teóricamente el flujo, en cuyo caso habría que cambiarlas.

En nuestro afán por conocer mejor el estado físico del interior solar podríamos preguntarnos: ¿Existen otros parámetros observables que nos puedan proporcionar información acerca de la estructura de una estrella (por ejemplo, el Sol)? La respuesta es afirmativa. Y los parámetros susceptibles de observación son determinantes de la estructura solar. Comparemos con lo que ocurre en la investigación del estado físico del interior terrestre. La transmisión o no, las frecuencias y las variaciones de amplitud de las ondas, producidas por terremotos o explosiones, permiten determinar parámetros físicos importantes, a saber: densidad, presión, temperatura y composición química de las zonas por las que atraviesan.

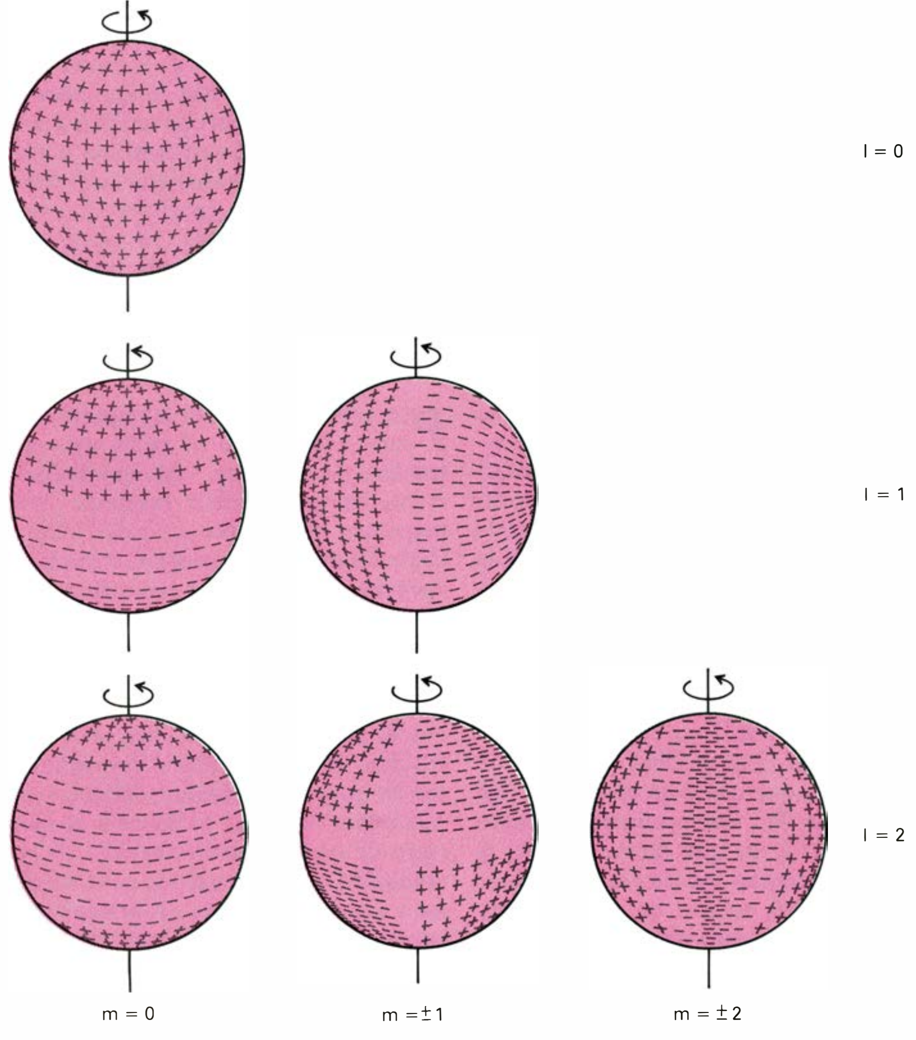
Por experiencia en el laboratorio se sabe que cuando se excita una estructura cualquiera, comunicándole cierta energía, aquella responde con pequeñas vibraciones u oscilaciones, llamadas normales o propias, cuyas frecuencias determinan la naturaleza del objeto de que se trata. Una estructura simple, un diapasón por ejemplo, al golpearlo, vibra con una frecuencia que le es característica y con una amplitud que es proporcional a la energía de excitación. (La frecuencia y la amplitud son las dos magnitudes que definen una oscilación. Se llama frecuencia al número de oscilaciones producidas en la unidad de tiempo; amplitud es el máximo valor de la distancia a la posición de equilibrio.) Otras estructuras más complicadas (instrumentos musicales, puentes y edificios) oscilan con toda una gama de frecuencias (el denominado espectro de frecuencias propias) y con distintas amplitudes. La determinación precisa del espectro de frecuencias propias y de sus amplitudes nos definirá la estructura del objeto sometido a vibración.

Al Sol le ocurre como a cualquier

EXCITACION VIBRACIONAL DEL SOL debida a la actividad interna del mismo. Las fotografías, obtenidas en la línea de H_α (correspondientes a una longitud de onda de 6563 angstrom), durante el mes de agosto de 1980, muestran la cromosfera del Sol en actividad. Pueden verse manchas solares, filamentos (*líneas obscuras*) y fáculas (*zonas más brillantes*), que son estructuras estrechamente ligadas al campo magnético. Este, en un momento determinado, puede excitar cualquier zona perturbada produciendo una fulguración y liberando gran cantidad de energía. Fenómeno que puede, por sí solo, excitar lo suficiente al Sol como para que éste manifieste sus vibraciones propias. (Instituto de Astrofísica de Canarias.)

instrumento musical: si se le excita, responde oscilando con unas frecuencias que dependen de su propia estructura física. La energía requerida para excitar estas oscilaciones, por ejemplo el modo fundamental radial, es de unos 10^{23} joule. No tenemos medio alguno para golpear el Sol, pero la naturaleza puede proporcionarnos mecanismos de excitación (interiores o exteriores al mismo) que pueden liberar la energía necesaria para ese "zarandeo". Recordemos, entre otros: explosiones en el núcleo producidas por la combustión nuclear, fulguraciones, meteoritos o cometas que caen sobre la atmósfera solar, etcétera. Cualquiera que sea el espectro de frecuencias propias del Sol, si pueden detectarse tendremos un instrumento muy eficaz en la sismología solar, para comprobar que nuestras hipótesis sobre su estructura física son o no correctas.

En general, las estrellas tienen simetría esférica. Y sus modos de oscilación son proporcionales a la expresión $\zeta_n(r) \cdot \gamma_l^m(\theta, \varphi)$, donde r, θ y φ son las coordenadas esféricas heliográficas. Dichos modos vienen caracterizados por dos números: n y l, que son el número de ceros de la función radial $\zeta_n(r)$ y de la función angular $\gamma_l^m(\theta, \varphi)$, respectivamente. Un tercer número, m, aparece cuando otro mecanismo, por ejemplo la rotación, interviene acoplándose a las oscilaciones normales dando lugar a $(2l + 1)$ nuevos modos, que corresponden a otras tantas posibilidades de acoplamiento. Esos nuevos modos vienen caracterizados por diferentes valores del número m. En una onda estacionaria, l representaría el número de líneas sobre la superficie que permanecen inmóviles: l valdrá cero cuando nos hallemos en oscilaciones puramente radiales.



OSCILACIONES SOLARES. La superficie solar, y la estelar en general, se ve perturbada por los diferentes modos propios de oscilación, según sean los valores de *l* y de *m*; donde *l* designa el número de ceros de la función angular de las coordenadas esféricas heliográficas y *m* corresponde al valor de rotación. Dado un modo normal con *l* fijo, la rotación solar se acopla con él de $(2l + 1)$ maneras distintas, tal como manifiesta la ilustración. En ella se han señalado con signos + y − zonas con velocidad positiva y negativa (alejándose y acercándose a nosotros, respectivamente). La densidad de signos da cuenta de la magnitud de la perturbación en cada zona, y, como se puede apreciar, para *l* mayor que cero se forman ondas sobre la superficie. A medida que *l* aumenta, crece el número de valles y crestas. Si quisiéramos dibujar sobre una esfera todos los posibles modos tendríamos un dibujo semejante a la superficie de cualquier océano.

Vale la pena deternerse en un mayor examen y clasificación de los modos de oscilación solar. Comencemos por los modos p. Se trata de oscilaciones de alta frecuencia que aumentan al hacerlo el número de ceros de la función radial n y de la función angular l. La fuerza restauradora del equilibrio se debe a la presión, por lo que esos modos pueden considerarse ondas acústicas normales. Se asemejan a los producidos en resonadores esféricos (grandes esferas metálicas con un pequeño agujero en su pared). Si ponemos a vibrar, en ellos, un diapasón cerca del agujero, excitará la masa de gas que hay en su interior; en el caso de que la frecuencia del diapasón coincida con alguno de los modos propios de oscilación de la masa de gas, se observará una amplificación del sonido. En el Sol, a falta de un diapasón en su centro o superficie, los mecanismos de excitación expuestos antes ejercerán una función similar.

Los llamados modos de oscilación g son, por contra, de baja frecuencia. Y ésta va disminuyendo a medida que baja el valor de n, dado un valor de l mayor que cero. La fuerza restauradora es ahora la gravedad. Las estrellas, y el Sol en particular, tienen un comportamiento algo más complejo que los resonadores esféricos, puesto que el gas de que están formadas no es uniforme en densidad ni homogéneo en su composición química. Ello hace que existan capas de diferente densidad moviéndose unas respecto de otras. Este movimiento acoplado con la acción de gravedad (llamado empuje de Arquímedes) perturba la frontera que los separa, propagándose a lo largo de ella como una onda. Y esto ocurrirá para diferentes capas cada vez más alejadas del centro, hasta llegar a la superficie, que es donde se observan. Los modos g de oscilación se producen también en los mares y océanos terrestres; en general, siempre que tengamos dos fluidos de diferente densidad que se mueven uno respecto del otro.

Existen, además, dos frecuencias que gobiernan las propiedades de propagación de ondas en la estrella: la llamada frecuencia de Lamb, L_l, que es la equivalente a la velocidad local del sonido dividido por una longitud de onda horizontal (en este caso el radio solar), y la frecuencia de Brunt-Väisälä, N, que es aquella con la que una burbuja de gas oscila adiabáticamente. Estas dos frecuencias delimitan una zona en la estrella donde una perturbación de frecuencia ω puede propagarse como una onda, donde ω designa cualquier número. Si el valor de ω fuera mayor

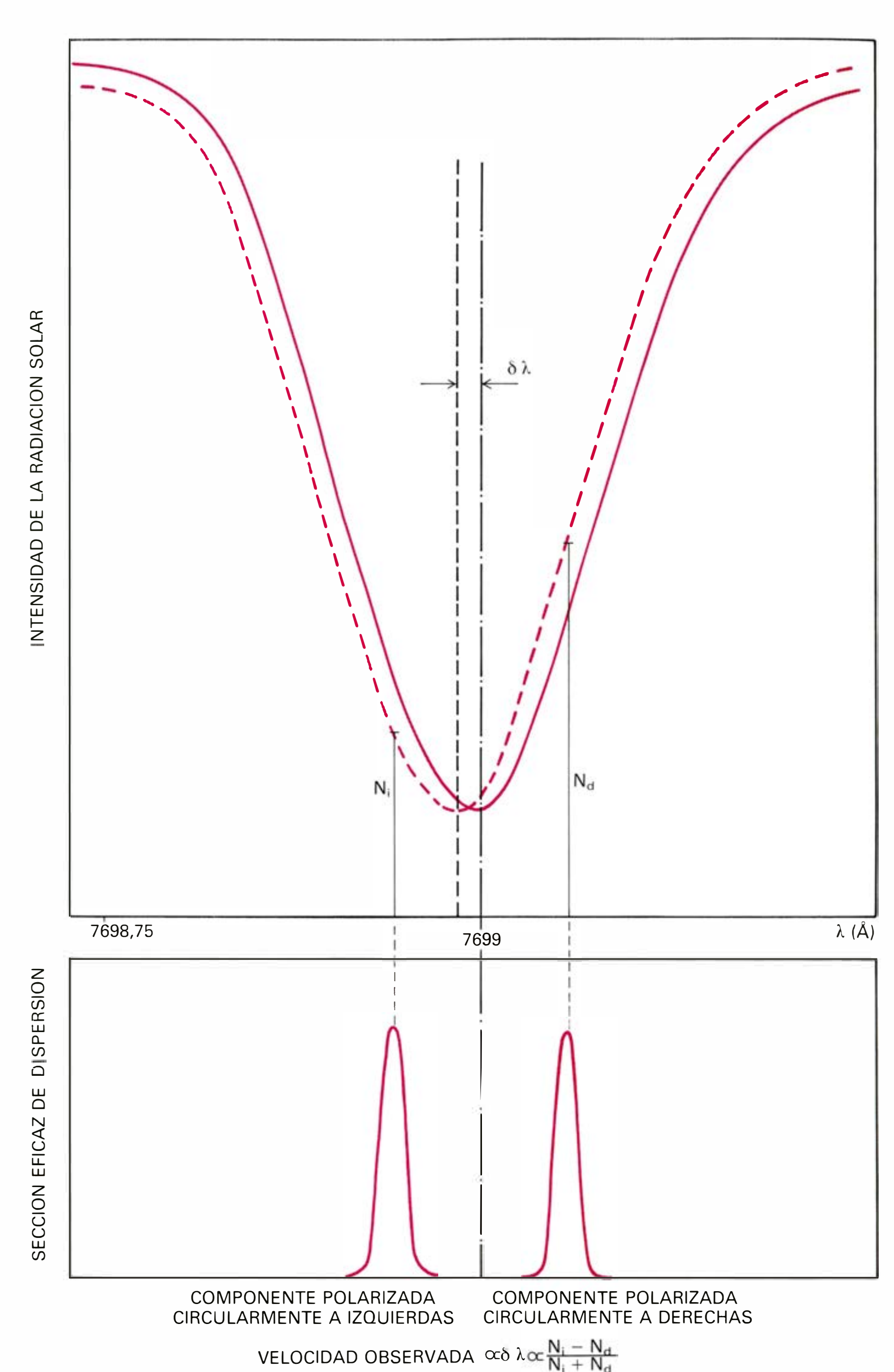
que la frecuencia de Lamb y menor que la de Brunt-Väisälä en la zona, sólo la presión actuará como fuerza restauradora y sólo los modos *p* de oscilación se propagarán en ella. En el caso opuesto, que en forma expresaríamos $\omega < L_l$ y $\omega > N$, es la gravedad la que actúa como fuerza restauradora y sólo se podrían propagar los modos *g*.

Fuera de estas zonas, la amplitud de las oscilaciones se amortiguan muy rápidamente, de tal suerte que la energía de las oscilaciones permanece confinada en las regiones de propagación. Esas dos frecuencias, L_l y N, así como su dependencia con la distancia al centro de la estrella, tendrán que ver con la estructura estelar y definirán los modos en los que la estrella puede oscilar, puesto que no todos serían necesariamente excitados. Sólo los modos cuya zona de propagación coincida con una región donde los mecanismos de excitación se muestren eficaces serán inestables y se excitarán aumentando su amplitud de oscilación.

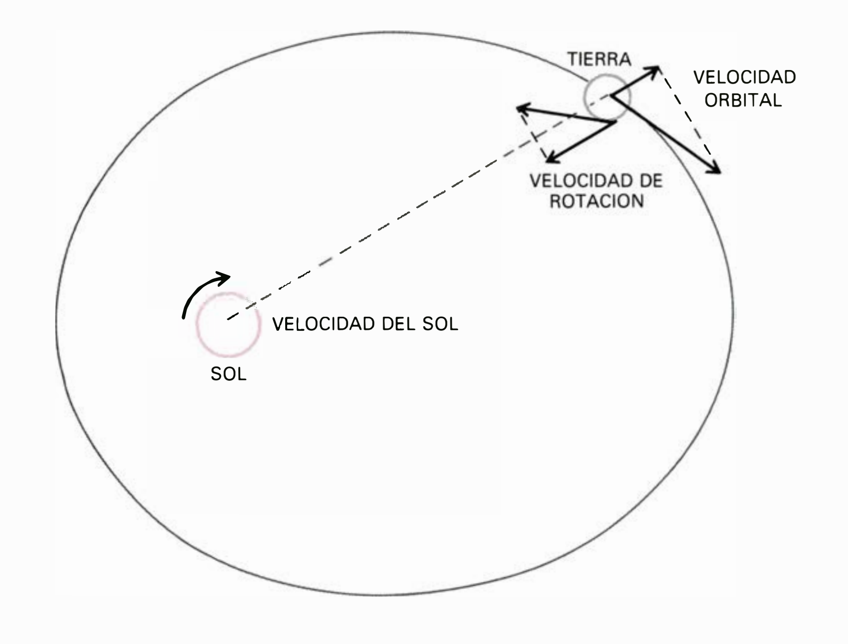
Desde 1960 se sabía que la superficie del Sol mostraba oscilaciones con un período característico de unos cinco minutos. Pero pasarían quince años desde esa observación pionera de R. Leighton, de la Universidad de California, hasta que se hablara de estas oscilaciones asociándolas a una excitación global de todo el Sol, tras la investigación de F. L. Deubner en el Observatorio alemán de Capri.

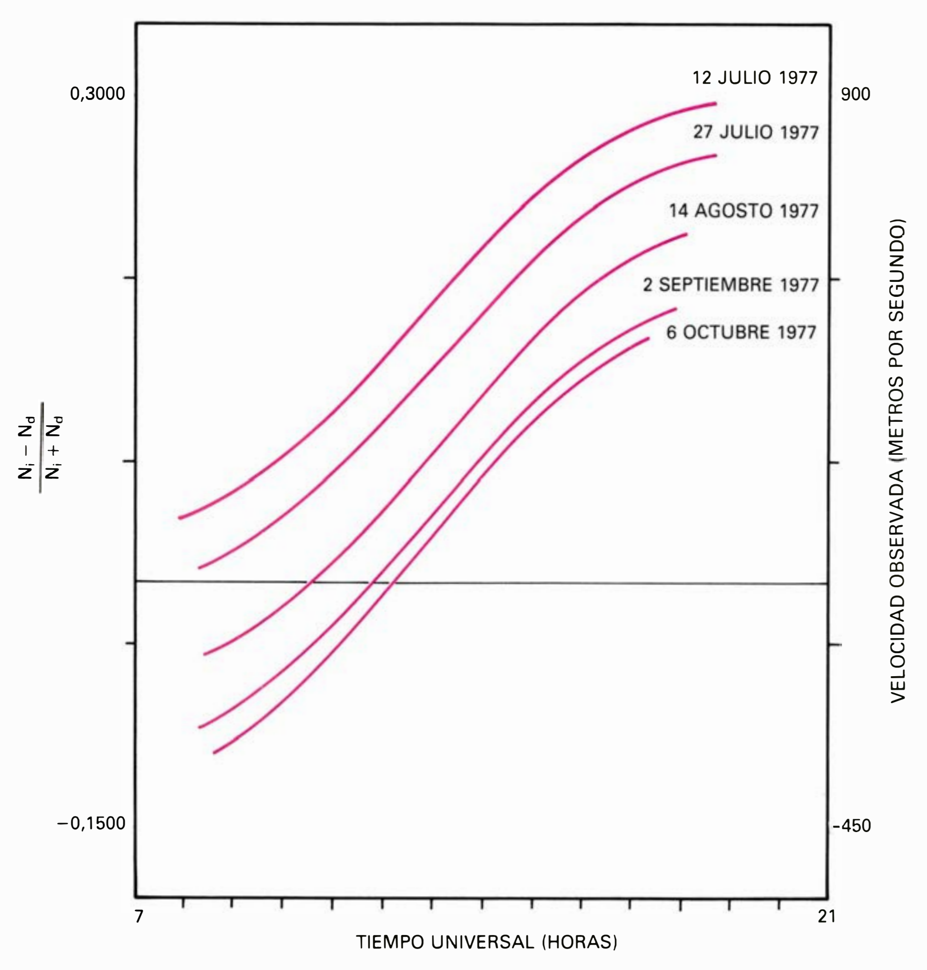
En 1975 se publicaron los primeros trabajos sobre observaciones de modos propios de oscilación del Sol de períodos más largos. Hacia finales de ese año, un grupo de la Universidad de Arizona, bajo la dirección de H. A. Hill, dio a conocer sus observaciones de oscilaciones, en la medida del diámetro del Sol, de períodos comprendidos entre seis y 70 minutos y amplitudes desde cinco hasta 20 milisegundos de arco. (El diámetro solar mide unos 1800 segundos de arco.) Algunos meses después, y simultáneamente, J. R. Brookes, G. R. Isaak y H. B. van der Raay, de la Universidad de Birmingham, y A. B. Severny, V. A. Kotov y T. T. Tsap, del Observatorio de Crimea, publican sus registros de velocidades fotosféricas, hechas en el Observatorio de Pic du Midi y en Crimea, respectivamente, con técnicas absolutamente diferentes y resultados asombrosamente iguales.

El grupo ruso de Crimea observó un período de 2,67 horas con una amplitud media de 2,2 metros por segundo; el de Birmingham observó períodos de 2,65 horas, 58 y 40 minutos con amplitudes de 2,7, 0,8 y 0,7 metros por segundo, respectivamente. La interpretación de estos resultados, a falta de información espacial, fue la más simple posible: el modo fundamental radial $l = 0$, el fundamental no radial $l = 1$ y su armónico. De ello se deducía que el Sol debería ser menos denso en su núcleo de lo que se esperaba y, aun siendo posibles otras interpretaciones, se ponían una vez más en entredicho los modelos solares comúnmente aceptados. A pesar de la diferencia entre los períodos y amplitudes encontrados por Hill y por los otros dos grupos mencionados, las observaciones constituyeron el punto



OBSERVACION DE VELOCIDADES FOTOSFERICAS solares por el método espectroscópico de dispersión resonante. En nuestro espectrofotómetro, luz integral solar debidamente filtrada (15 angstrom alrededor de 7699 angstrom) incide sobre átomos de potasio contenidos en una celdilla de vapor, colocada entre los polos de un imán permanente cuyo campo magnético de 1800 gauss es paralelo al haz incidente. El efecto Zeeman resultante separa las dos componentes σ, polarizadas circularmente a derechas (p.c.d.) y a izquierdas (p.c.i.), colocándolas sobre las alas de la línea solar. De este modo, si en el haz incidente seleccionamos luz polarizada circularmente en un sentido y después en el otro, podemos medir la intensidad de la luz dispersada resonantemente sobre cada una de las alas, N_d y N_i. Considerando que la línea es simétrica, si no existe velocidad relativa entre el Sol y el observador (*línea continua*), las intensidades medidas sobre las alas serán iguales, $N_i = N_d$ y el desplazamiento δλ de la línea nulo. En el momento en que esta velocidad no sea nula (*línea a trazos*), N_i no será igual a N_d y la fórmula nos dará la velocidad.





VELOCIDAD OBSERVADA en función del tiempo. En el gráfico superior las diferentes contribuciones, a la velocidad observada, de los movimientos relativos entre la fotosfera solar y el observador. Sólo las proyecciones sobre la dirección de observación son las que producen desplazamientos en la línea de absorción solar y pueden, por tanto, detectarse. La componente variable a lo largo del día, V_{rot}, corresponde a la rotación terrestre; varía de un modo sinusoidal con un período de 24 horas, según nos enseña cada una de las curvas del gráfico inferior. V_{orb}, correspondiente a la rotación de la Tierra alrededor del Sol, puede considerarse constante durante las horas de observación de un día; se contempla su efecto en el gráfico inferior, donde las curvas para diferentes días muestran posiciones diversas, que se refleja en el desplazamiento vertical de las mismas. Los otros términos, V_{grs} y V_0, son constantes. Las variaciones V(t) en V_{sol}, correspondiente esta última a la velocidad de las capas fotosféricas solares, son las rugosidades que se aprecian en las curvas y que pertenecen a oscilaciones de las capas atmosféricas solares.

de partida de toda una serie de medidas y observaciones encaminadas a la detección de las oscilaciones solares.

Desde el punto de vista observacional, las oscilaciones afectarán a varios parámetros susceptibles de medida en el Sol. Podremos observarlas, pues, midiendo las variaciones registradas en determinados parámetros: diámetro solar, luminosidad, temperatura efectiva y velocidad de la fotosfera, entre otros. Aquí nos vamos a ceñir a las medidas de la velocidad de la fotosfera solar observando luz integral, entendiendo por tal la proveniente de todo el disco solar, mediante el uso de la técnica espectroscópica de la dispersión (scattering) resonante, que hemos venido usando en estrecha colaboración con el grupo de la Universidad de Birmingham.

Para medir la velocidad de la fotosfera solar se recurre al efecto Doppler, que dice que, si un observador se mueve acercándose a un manantial de luz, en cada segundo le llegan al observador más ondas que si está en reposo; mientras que si se aleja del manantial recoge menos ondas. De ese mismo efecto se sigue también que una radiación monocromática producida por una fuente cualquiera, que se mueve respecto de un observador, es medida por éste con una longitud de onda diferente de la que tenía cuando se emitió. Utilizando una línea de absorción del espectro solar y midiendo su posición relativa con respecto a una línea estándar producida en el laboratorio podemos conocer cómo se mueve la capa atmosférica solar, donde se encuentran los átomos que forman dicha línea con respecto al observador en el laboratorio.

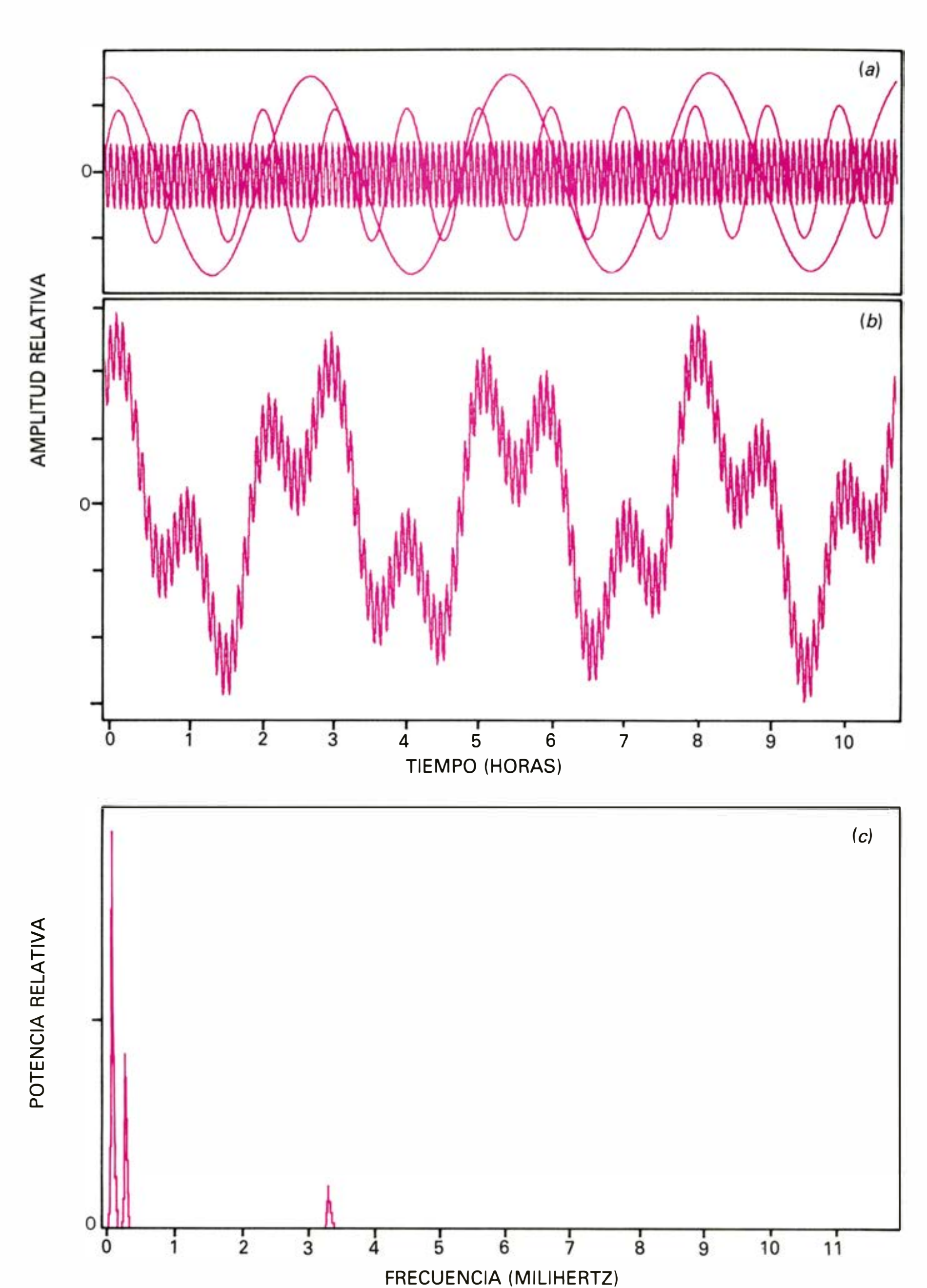
Nuestro grupo emplea una técnica espectrométrica nueva, de alta resolución, propuesta por G. R. Isaak: espectroscopía de dispersión resonante. Dicha técnica nos proporciona un método para comparar directamente líneas espectrales producidas por una fuente cualquiera con transiciones energéticas en átomos, bajo condiciones controlables en el laboratorio. En nuestro caso usamos la línea de absorción del potasio KI a 7699 amstrong, producida en el Sol, para excitar átomos de la misma especie en estado libre, en el laboratorio. La energía de excitación se debe íntegramente a la radiación incidente que provoca una dispersión resonante en los átomos en el laboratorio. Las observaciones efectuadas por nuestro grupo, desde 1975, en el Observatorio del Instituto de Astrofísica de Canarias instalado en Izaña (Tenerife) y en los años 1974, 1978 y 1979 en Pic du Midi (Fran-

cia), se han realizado bajo buenas condiciones atmosféricas. En el estudio de las oscilaciones de período largo se han empleado sólo días de más de ocho horas de observación continua.

El resultado obtenido en la medición de la velocidad fotosférica solar, tras un día completo de observación, contiene la superposición de varias componentes. La velocidad proyectada sobre la línea de observación, que es la velocidad observada, puede descomponerse vectorialmente de la forma siguiente: la velocidad observada es igual a la suma vectorial de la velocidad orbital de la Tierra alrededor del Sol, que puede considerarse constante durante un día, más la velocidad de rotación de la Tierra alrededor de sí misma, que varía sinusoidalmente a lo largo del día, más la contribución equivalente en velocidad, debida al desplazamiento hacia el rojo que sufre la radiación monocromática habida cuenta de la diferencia en intensidad de campo gravitatorio entre la fuente (el Sol) y el observador (la Tierra). A esos tres sumandos, la velocidad de traslación de la Tierra alrededor del Sol –que simbolizaremos por V_{orb}–, la velocidad de rotación, V_{rot}, y la contribución debida al desplazamiento gravitatorio hacia el rojo, V_{grs}, hay que sumar una cuarta componente: V_{sol}, que es la contribución de la velocidad de las capas fotosféricas solares. Esta última, V_{sol}, tiene a su vez dos componentes; una constante, que llamaremos V_0, debida al promedio sobre el disco solar del efecto de borde, y otra componente variable con el tiempo, que llamaremos V(t), y que es la que contiene la información que nos interesa medir.

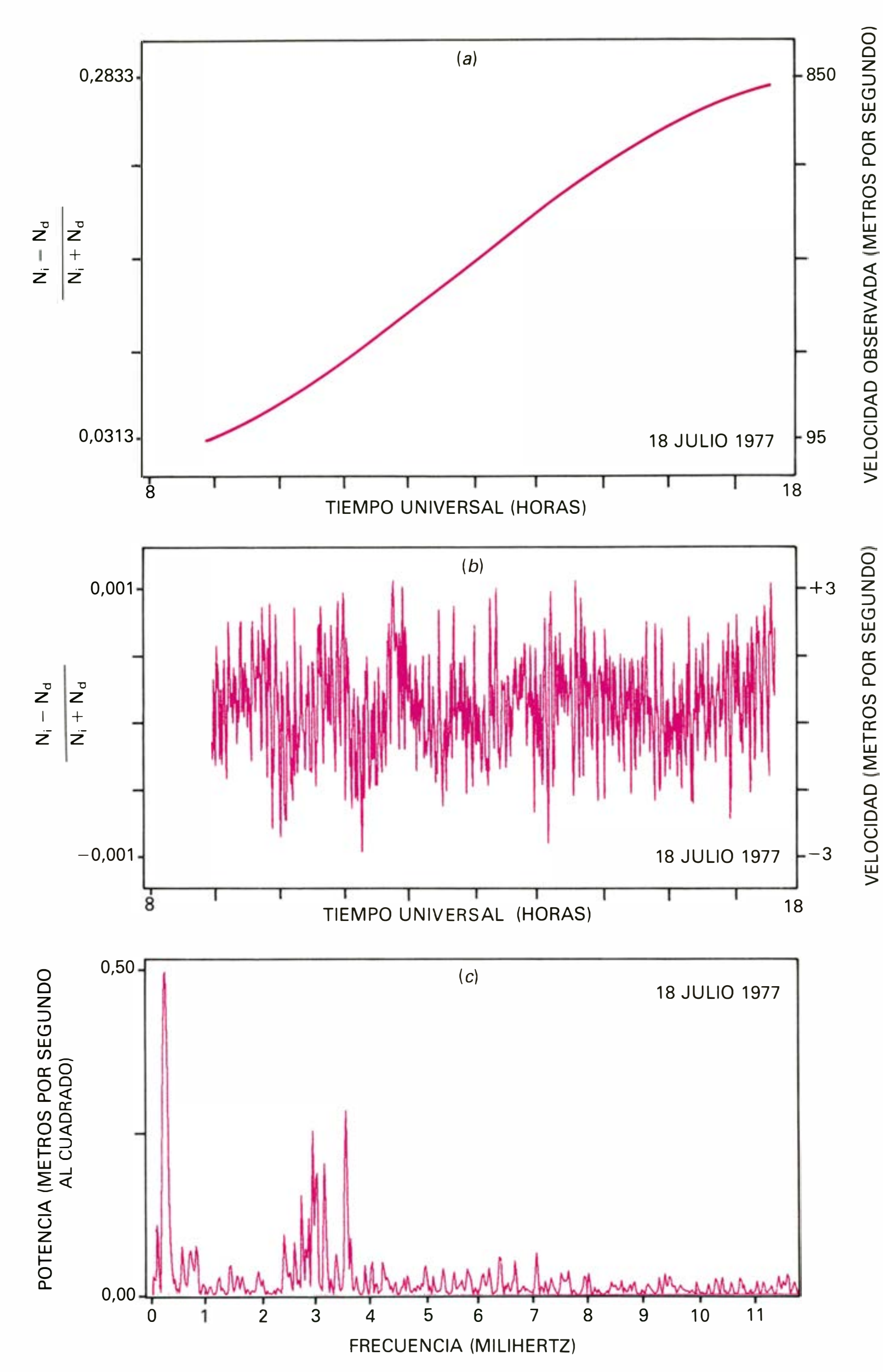
Supongamos que, mediante un proceso matemático denominado de ajuste de mínimos cuadrados, hemos despejado el valor de los términos conocidos de entre los factores que componen la velocidad observada, V_{obs}. Nos resta analizar V(t). Vamos a someterla a un análisis de armónicos por medio del uso del espectro de potencias. En general, cualquier función o señal que al cabo de cierto tiempo se repita –que sea armónica, es decir, que tenga una periodicidad– admite una representación matemática como suma de ondas (senos y cosenos) de diferentes amplitudes, frecuencias y fases. El espectro de potencia de esta señal nos proporciona la contribución de cada onda, o término de la suma, a la potencia de la misma. Dicha potencia es proporcional al cuadrado de la amplitud.

En nuestro caso particular tenemos una señal, V(t), que viene dada por N puntos separados por un intervalo temporal de 42 segundos entre sí; señal que es limitada en el tiempo: de unas ocho a unas 11 horas. Suponiendo que esa señal sea periódica de período T, donde T equivale al producto del número de puntos por el intervalo temporal, podemos someterla al análisis de armónicos en cuestión y conocer así qué ondas, entre las que pueden representarla, contribuyen en mayor medida a su formación. El espectro de potencias nos da una serie discreta, equiespaciada en frecuencias.



ANALISIS ESPECTRAL **o de armónicos de una señal temporal. Se recoge aquí un ejemplo teórico de lo que es un análisis de armónicos de una serie o señal temporal. Se han generado teóricamente tres sinusoides de períodos 2,6 horas, 1 hora y 5 minutos con amplitudes de 3:2:1 y fases de 0,4, 0 y 1,4 radianes, respectivamente, representadas en *a*. En el gráfico siguiente (*central*) aparece su suma, que constituye una señal de duración finita *T*. Bajo la hipótesis de que esta serie es periódica, de período *T*, podemos someterla a un análisis de armónicos calculando su espectro de potencia. En él, gráfico *c*, obtenemos tres picos que corresponden a ondas de frecuencias o períodos que intervienen en la formación de la señal *b*. Esas frecuencias coinciden con las de las sinusoides generadas en *a*; por otro lado, las alturas de los picos están en la relación 9:4:1, tal como corresponde a la relación generada de amplitudes. (Recuérdese que la potencia es proporcional al cuadrado de la amplitud.) En casos reales se parte de las observaciones, que corresponden a *b*, aunque con ruido, mientras que el análisis trata de llegar a conocer *a* por medio de *c*.**

En cada espectro de potencias de casi todos los días de observación se contemplan máximos o picos en la zona de bajas frecuencias (correspondientes a períodos entre 30 y 200 minutos). En todos ellos, se registra potencia en la zona de la oscilación de cinco minutos. En la zona de bajas frecuencias, los picos en el espectro no parecen ser muy estables a lo largo de los días de observación, es decir: unos días aparecen en una frecuencia y, otros, en otra distin-



ANALISIS de la velocidad observada a lo largo de un día. Una vez descontaminada la velocidad observada de todas las componentes conocidas, nos quedamos con V(t) que es la contribución de la velocidad de las capas atmosféricas solares y cuya representación corresponde a *b*. En *c*, el espectro de potencia de la señal V(t), donde se aprecian picos en bajas frecuencias y alrededor del período de cinco minutos.

ta. Sólo el máximo absoluto parece estar en todos ellos, si bien con diferente potencia. De todas maneras, en esta zona del espectro se tiene poca resolución a la hora de determinar con exactitud el período o la frecuencia, puesto que el espaciado entre frecuencias es del orden de magnitud de las frecuencias propias (por ejemplo, en cuanto al máximo absoluto, el espaciado viene a ser de un 65 por ciento del valor de la frecuencia correspondiente).

Para afinar más en la determinación del período, podemos utilizar el método de prueba y error. Se generan sinusoides teóricas con amplitud, período y fase variables (el período lo conocemos aproximadamente del espectro de potencias) y se comparan con los datos observados. Se puede hallar así cuál será la sinusoide o sinusoides que mejor ajustan los datos, en el sentido de hacer mínimo el error cuadrático medio. Aplicando este método a nuestras observaciones de 1976, hemos llegado a la conclusión de que la oscilación correspondiente al máximo absoluto no era estable ni en período, ni en amplitud, ni en fase.

Para obtener una mejor estimación de la contribución que aporta cada armónico a la potencia de la señal, y contemplar la estabilidad de todos ellos a lo largo de una sesión de observación, podemos usar el espectro medio de cada sesión. Resulta éste de promediar con igual peso todos los espectros de potencias de los distintos días de observación. Se ve en ese espectro la existencia de un máximo absoluto, correspondiente a un período de 210 minutos, y varios picos e inflexiones en la curva en torno a los 79, 57 y 45 minutos. Hay, además, claros máximos en la zona de los cinco minutos. La amplitud del máximo absoluto ha decrecido desde 2,7 metros por segundo, en 1974, hasta casi 0,5 metros por segundo en 1980. Descensos drásticos que no han experimentado los demás picos, aunque la verdad es que se hallan a nivel de ruido, lo que les resta fiabilidad a la vista de un solo espectro; si nos fijamos, empero, en los tres, apreciaremos que en todos se repiten. No cabe duda de que esos picos corresponden a modos propios de oscilación solar, si bien su amplitud, muy pequeña, exige que se elabore una técnica más refinada para su precisa detección. La información espacial sobre la distribución de estas oscilaciones en el disco solar ayudará a identificarlas.

El grupo del Observatorio de Crimea ha venido trabajando en sintonía con otro de la Universidad de Stanford, usando un magnetógrafo especialmente modificado para medir velocidades relativas entre el centro del disco solar y el borde. Han llegado a los resultados siguientes: si bien la amplitud de tal período se redujo el año 1976 y posteriores, la oscilación ha mantenido un período estable, durante esos mismos años, de 160.01 minutos. Otros grupos, a los que no les acompañó el éxito, sostuvieron que la oscilación se debía por entero a algún tipo de ruido (atmosférico, instrumental, etcétera). Pero no se trata sólo de que la observación resulte difícil, por mostrar una amplitud muy baja: inferior a los 0,5 metros por segundo. Existe el problema de la imposibilidad de obtener registros largos que trasciendan las 11 horas de observación en los centros dedicados a ello. ¿Qué significa todo eso? Pues que en un registro diario se obtienen, a lo sumo, tres o cuatro ciclos de este período, lo que dificulta su determinación. Los problemas del ruido atmosférico y la alternancia día-noche han empezado a encontrar solución en una reciente ob-

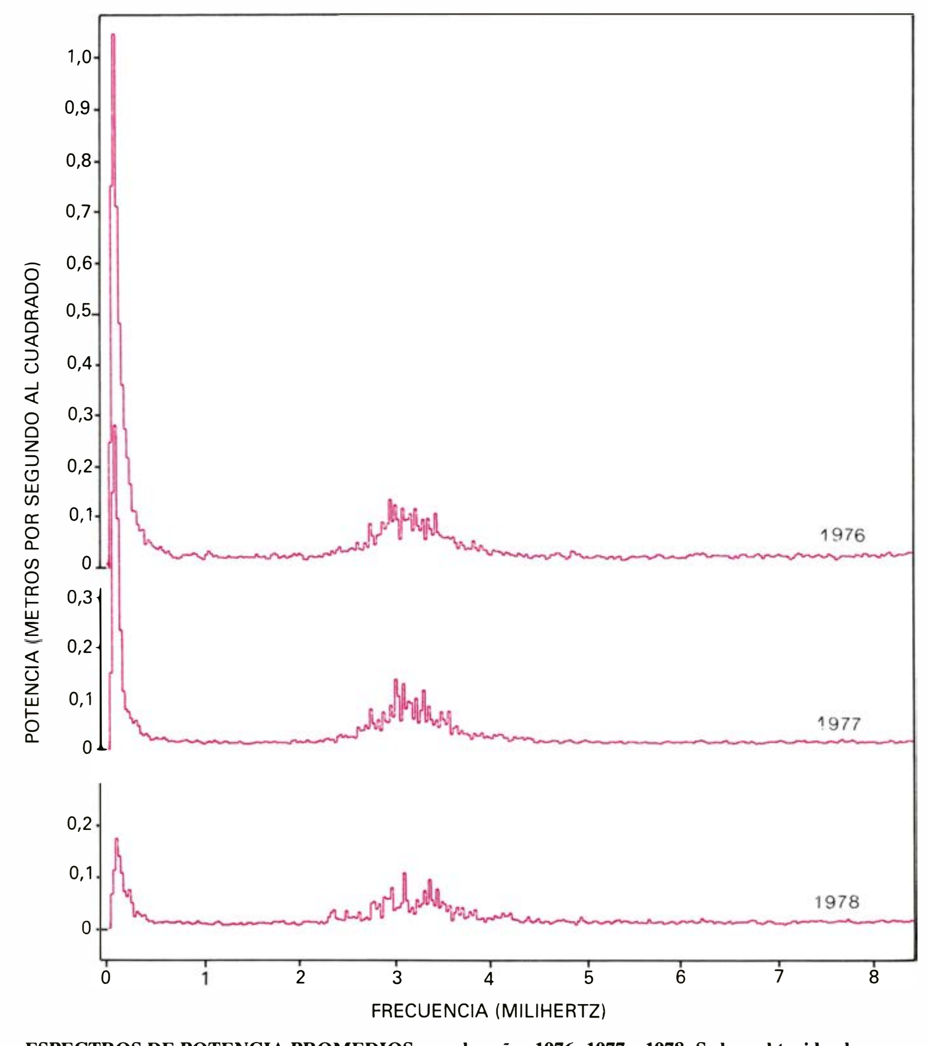
servación en el polo Sur. En efecto, en el verano austral de 1979-1980, E. Fossat, G. Grec y M. Pomerantz, usando una técnica espectrométrica por dispersión resonante (muy parecida a la usada por nosotros), consiguieron un registro continuado durante 120 horas. Análisis preliminares de estos datos muestran una oscilación de 160.01 minutos en fase con las que venían observando los grupos de Crimea y Stanford. Nuevas observaciones en esa zona terrestre o fuera de la Tierra, en un satélite artificial, habrán de aportar información de gran valor para la determinación exacta de esas oscilaciones.

Los máximos que aparecen en torno a los tres milihertz corresponden a la conocida oscilación de cinco minutos. Desde su descubrimiento ha sido objeto de intensa investigación. Observacionalmente se la había identificado como un proceso aleatorio de banda estrecha (anchura aproximada de un milihertz), asociado a movimientos verticales en la fotosfera solar. La frecuencia central es de 3,1 a 3,4 milihertz según la altura de la fotosfera en donde se observa; la vida media de la oscilación gira alrededor de los 23 minutos. Tanto su descubrimiento como la intensa observación posterior se han realizado usando pequeñas porciones del disco solar; se ha visto que, a medida que el área observada aumenta, disminuye su amplitud, hasta el punto de que analizando la luz procedente de todo el disco solar su amplitud se reduce a menos de 1 metro por segundo. Hemos tenido que esperar el desarrollo de las nuevas técnicas espectroscópicas para poder medirla e interpretarla correctamente como veremos más adelante. No han sido muchos los esfuerzos empeñados en distinguir entre picos diferentes que corresponden a frecuencias diversas, dentro de ese amplio pico; en todos ellos, además, se han promediado pocas horas de observación y ha sido pequeña también la porción de disco observada.

De nuestras propias observaciones se desprende que hay indicios suficientes para asegurar la existencia de una estructura. Los promedios, temporales y espaciales, son muy grandes y las diferencias de potencia, entre máximos y mínimos, están muy por encima del nivel de ruido. Por si fuera poco, la estructura se repite de un año a otro. Para comprobar que esa estructura no podía producirse aleatoriamente, sino que respondía a la composición de ondas de frecuencias diferentes, procedimos como sigue. Tomamos las observaciones de dos consecutivos y, uniéndolas por medio de ceros (durante la noche), se formó una serie que se sometió luego a análisis de armónicos. En el espectro de potencias se observaron picos distintos correspondientes a otras tantas sinusoides de frecuencias diferentes. Para demostrar que era así, se restó de la serie inicial sinusoides generadas teóricamente con frecuencias que daba el espectro, optimizando en cada caso la fase y la amplitud. El espectro de potencia de la serie resultante no ofrece ninguno de los máximos que correspondían a ondas restadas.

Con el fin de verificar que esta estructura no se debe a ningún efecto atmosférico ni instrumental se han correlacionado las observaciones obtenidas simultáneamente a lo largo del año 1978 en los dos centros mencionados de Izaña y Pic du Midi. La correlación en estas frecuencias es muy buena, tanto en las sucesiones temporales como en los espectros de potencia, poniendose de manifiesto que se trata de un efecto solar. Uniendo las observaciones de cuatro días consecutivos (añadiendo ceros durante las noches para preservar la fase) con el fin de ganar en resolución espectral, nos aparece, en los espectros de potencia promedios para cada año, 27 líneas diferenciadas y equiespaciadas. Se interpretan como modos *p* de oscilación de todo el Sol. La anchura de las líneas sugieren que las oscilaciones son coherentes sobre estos cuatro días, lo cual nos da un límite inferior para la constante de amortiguamiento del Sol, cifrada en 3000.

La identificación de esas oscilaciones propias, sin tener información sobre su estructura espacial, resulta difícil y no puede hacerse con absoluta certeza. Al hacer uso de luz integral, nuestras observaciones tienden a promediar modos con valores de l grandes (muchas crestas y valles sobre la superficie solar) restringiéndolas a la observación de modos con valores de l pequeños. Esas consideraciones sugieren que los modos observados son de l pequeño, posiblemente de $l = 0$ y $l = 1$, con valores de l pares e impares alternándose

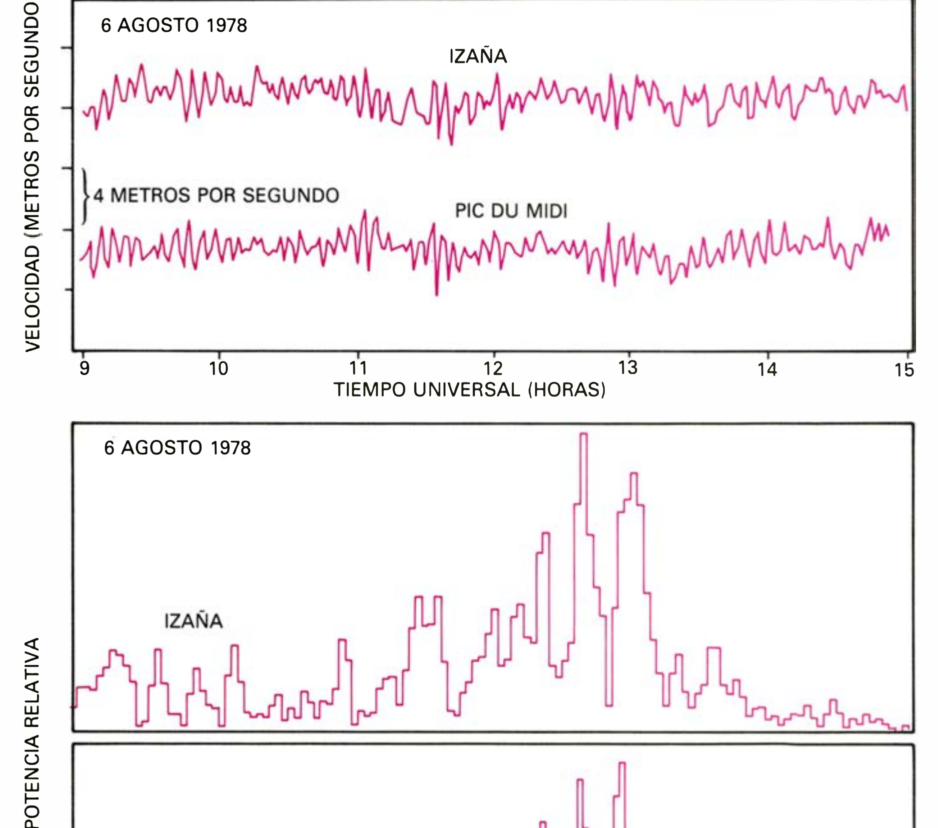


ESPECTROS DE POTENCIA PROMEDIOS para los años 1976, 1977 y 1978. Se han obtenido al promediar 33, 35 y 12 espectros individuales para los años referidos, respectivamente. Se aprecia cómo el máximo absoluto correspondiente a 210 minutos ha ido decreciendo cada año en potencia; se infiere, asimismo, que existen indicios de picos en períodos de 79, 57 y 45 minutos con potencia bastante inferior y cómo aparecen varios picos alrededor del período de cinco minutos (correspondiente a 3,1 milihertz).

a medida que aumenta n. La separación entre las frecuencias que corresponden a picos es, en promedio, de 67,8 milihertz, mientras que, entre las de modos de igual l, es de 135,6 milihertz. Analizando las amplitudes, de 0,1 a 0,3 metros por segundo, y de su variación a lo largo de los días de observación, esperamos obtener información sobre los mecanismos de excitación y amortiguamiento.

Estos picos observados constituyen, de hecho, multipletes no resueltos con diferentes valores de n y l y degeneración de $(2l + 1)$. La rotación solar debe acoplarse con estos modos de oscilación y desdoblar los multipletes de $(2l + 1)$ líneas, que corresponderán a diferentes valores de m. Su distancia relativa nos dará una idea de la velocidad angular media del Sol. En este sentido, nosotros conseguimos, durante el verano de 1980, un registro de 28 días de observación consecutivos. Usando todos estos días y, a través de un ajuste matemático de senoides de diferente frecuencia, logramos determinar la amplitud y fase con que cada una de ellas contribuyen al registro observado. Un registro así de largo nos permite determinar la frecuencia de las líneas con una resolución de 0,00043 milihertz; ello posibilitó resolver, por primera vez, los multipletes (de $l = 0$, 1 y 2) mencionados antes en $(2l + 1)$ líneas (es decir, 1, 3 y 5 líneas diferentes) separadas 0,00075 milihertz en promedio. Si comparamos este valor con el de 0,0004 milihertz que debería haberse encontrado si las capas interiores del Sol rotasen con la misma velocidad que lo hacen las superficiales, llegamos a la conclusión de que las capas subfotosféricas (aquellas por donde se propagan los modos p) giran con una velocidad mayor que las superficiales. Una vez más, dependiendo de los modelos solares que puedan calcularse, su velocidad de rotación será de 2 a 9 veces la de la superficie solar.

¿Cómo se construye un modelo solar? ¿Cómo se coteja el modelo con la observación real? La teoría de la estructura de las estrellas en la secuencia principal del diagrama de Hertsprung y Rusell, a la que pertenece el Sol, supone que, en cada punto de la estrella, se verifican las siguientes situaciones: un equilibrio hidrostático entre la fuerza gravitatoria y el gradiente de presión, un transporte de energía por convección y radiación (o por una u otra) y una producción de energía por reacciones nucleares. Estas hipotéticas suposiciones pueden expresarse en cuatro ecuaciones diferenciales de primer orden, junto con condiciones de contorno y relaciones entre parámetros que intervienen en ellas, como son: (*a*) la ecuación de estado de la materia que constituye la estrella; (*b*) la opacidad al transporte energético, que depende de la composición química, y (*c*) los ritmos de las reacciones nucleares que intervienen en la producción de energía. Los únicos datos requeridos para construir un modelo son: la masa total y la composición química inicial a lo largo de la estrella. Lo que se obtiene es la variación de los parámetros físicos a lo largo de la estrella, el radio y la luminosidad totales, la distribución de los procesos de transporte de energía y la temperatura central. Después, pueden calcularse sobre estos datos los modos propios de oscilación del Sol y el flujo de neutrinos.



COMPARACION DE OBSERVACIONES efectuadas simultáneamente en dos lugares diferentes. Los gráficos revelan que la señal obtenida alrededor de los 3 milihertz tiene un origen solar. Se muestran los dos registros de la velocidad fotosférica solar a lo largo del tiempo, conseguidos en Izaña y Pic du Midi, el 6 de agosto de 1978 (*arriba*), y sus respectivos espectros de potencia (*abajo*). Cabe destacar la correlación que existe entre los dos registros; no se ha de imputar, pues, a efectos instrumentales o atmosféricos.

Conocemos bien la masa del Sol. Lo que no podemos afirmar de su composición química inicial: X, Y, Z; donde X simboliza fracciones de masa de hidrógeno, Y de helio y Z, de elementos pesados. En la práctica, se suele suponer una composición química inicial homogénea para construir luego una serie de modelos dependientes de dos parámetros libres. Se elige como modelo adecuado aquel que, en la edad actual calculada para el Sol, ajusta su luminosidad presente. Los caminos seguidos por los investigadores podríamos sintetizarlos en dos. Unos, así I. Iben y J. Mahaffy, mantienen constante el valor de Y (obtenido de otras observaciones astrofísicas), mientras se construyen modelos con diferente valor de las concentraciones de metales pesados, Z. Otros, así J. N. Bahcall, mantienen constante el valor Z/X (dado por observaciones espectroscópicas de la fotosfera solar) y elaboran modelos con diferentes valores de Y. D. D. Gough,

J. Christensen-Daalsgard y J. G. Morgan, adscritos al primer grupo, diseñan modelos con valores de Z incialmente uniformes, aunque sugieren que la fotosfera solar se ha ido enriqueciendo de elementos pesados por captura de materia interplanetaria hasta dar el valor actual de la fotosfera, cifrado en 0,02.

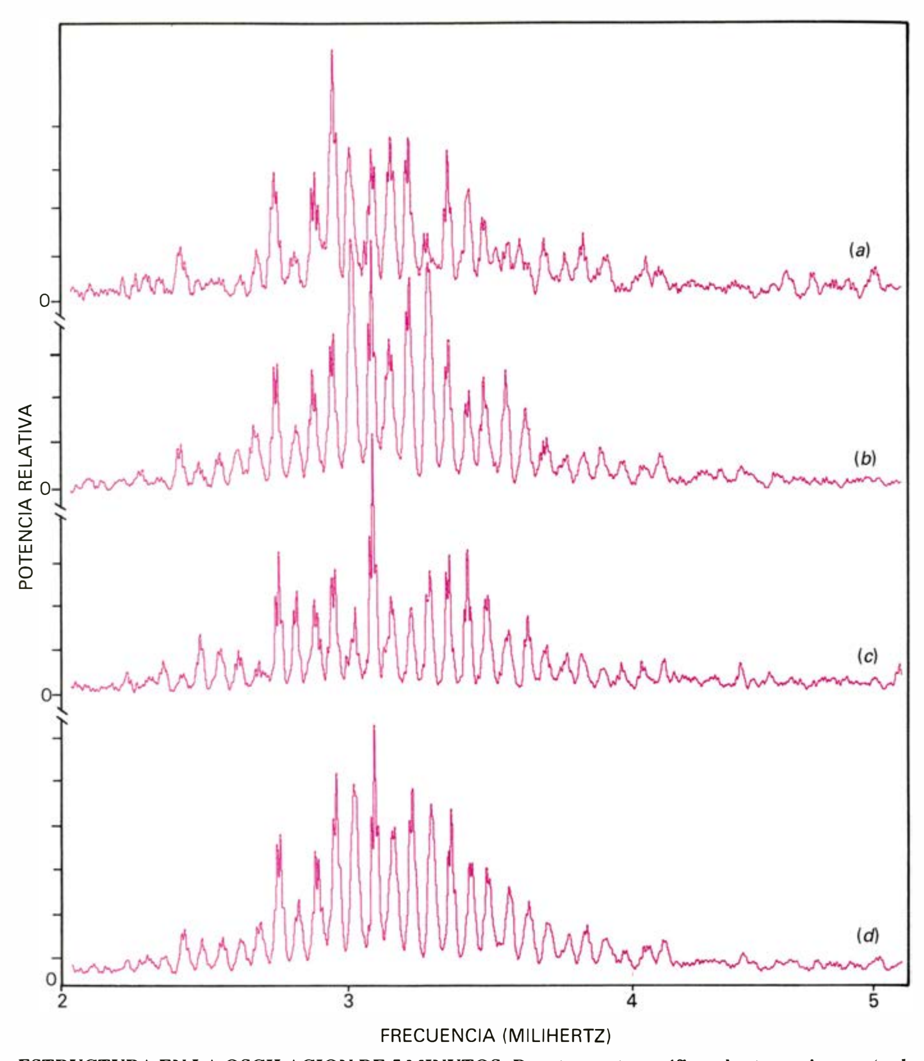
Cuando se calculan luego los modos propios de oscilación de cada modelo se halla que la separación entre las frecuencias correspondientes a modos p de l dado, para valores de n distintos, tiende a un valor constante al crecer n. Esos valores se sitúan entre 130 y 142 milihertz para valores de Z comprendidos entre 0,001 y 0,03.

La separación observada entre frecuencias correspondientes a picos cae dentro del corto rango de variación de separaciones predichas por diferentes modelos solares que difieren en la abundancia de los elementos pesados. De una extrapolación de modelos con valores de Z no uniformes, se infiere que la distancia registrada corresponde a valores de Z de 0,004 o menos. Esos mismos modelos solares con semejante valor de Z predicen un flujo de neutrinos, procedentes del núcleo solar, que se estima en $\leq$ 2,3 SNU, que es coherente, dentro de los límites de error aceptados, con el valor observado por R. Davis, que es de 1,8 $\pm$ 0,4 SNU (SNU es la abreviatura inglesa de "*So*lar *N*eutrino *U*nits").

Esa misma interpretación de las observaciones conduce a una abundancia de helio en el Sol supuesta en el 17 por ciento de toda la masa solar (es decir $Y = 0{,}17$), lo que coincide con el valor que ofrecen las observaciones relativas al viento solar y a los rayos cósmicos. Por consiguiente, esas cuatro observaciones (oscilaciones solares, neutrinos solares, viento solar y rayos cósmicos) se ajustan bien con una abundancia real de helio igual o por debajo del valor dado antes, de $Y = 0{,}17$. Como la combustión del hidrógeno, desde la formación del Sol hasta nuestros días, ha incrementado la concentración de helio, habida cuenta de que se desconoce que existan mecanismos para destruirlo en el Sol, llegamos a la conclusión de que la abundancia de ese gas en el material que formó el Sol no alcanzó el 17 por ciento. Valor que es menor que el promedio de los obtenidos para Y en la fotosfera solar y otros objetos del universo. También es inferior al valor preferido para los modelos cosmológicos, hoy en vigor, que lo cifran en 0,25 o 0,27. ¿Habrá que revisar éstos?

Como hemos comprobado, la medida de la separación entre frecuencias correspondientes a estos modos supone una fuerte condición y reduce el abanico de posibles modelos solares. La determinación precisa de sus frecuencias y su identificación con los valores adecuados de n y l limitarán aún más los modelos solares que se diseñen. Un enfoque interesante del problema de la comparación entre modelos y observaciones, sugerido ya por algunos autores, consistiría en invertir el procedimiento actual; es decir: a partir del espectro de frecuencias propias observado reconstruir los parámetros físicos que intervienen en su formación; esta práctica se usa en geofísica, y su aplicación a la sismología solar no parece que pueda presente problemas adicionales.

La observación en la zona de bajas frecuencias de los modos de oscilación debe resultar todavía más determinante en este proceso. Penetran hasta regiones más interiores del Sol, hasta el propio núcleo, y llevan información del mismo y de sus capas envolventes. Para la identificación precisa de todos esos modos hay que disponer de datos espaciales relativos al disco solar. En este sentido, nuestro equipo ha probado con éxito una versión del espectrofotómetro bidimensional capaz de resolver el disco solar. Y es de esperar que, en el futuro, esas observaciones sirvan para determinar el número l y m de los modos de oscilación y poderlos identificar con exactitud.



ESTRUCTURA EN LA OSCILACION DE 5 MINUTOS. De estos cuatro gráficos, los tres primeros (*a, b* y *c*) corresponden al promedio de espectros de potencia de series obtenidas con las observaciones de cuatro días consecutivos, con ceros durante la noche para mantener la fase. En cada uno de ellos se han promediado 5, 8 y 3 espectros de potencia de las series antes descritas para 1976, 1977 y 1978, respectivamente. En el gráfico inferior, *d*, tenemos el promedio de todas las series formadas a lo largo de esos tres años. Aparecen 27 picos diferenciados y equiespaciados. La estructura fina que se adivina en el interior de muchos picos de éstos se debe a la formación de las series, pues en ellas hemos introducido un período ficticio de 24 horas (al poner ceros durante la noche). Esa periodicidad permite desdoblar los picos. Un efecto parecido, aunque real, tendría la rotación solar al acoplarse con las oscilaciones correspondientes a cada pico que, en nuestro caso, queda artificialmente enmascarado por la razón que acabamos de decir.

Si el Sol está oscilando, vibrando como si fuera un instrumento musical, resulta muy verosímil que las restantes estrellas que pueblan el firmamento hagan lo propio. Al igual que con el Sol, las observaciones de sus frecuencias nos está revelando su estructura.

Búsqueda de bosones vectoriales intermedios

En teoría, estas partículas elementales dotadas de gran masa son necesarias como mediadoras de las fuerzas nucleares débiles. Debieran detectarse a raíz de las colisiones entre protones y antiprotones en los nuevos aparatos

David B. Cline, Carlo Rubbia y Simon van der Meer

Uno de los mayores éxitos obtenidos por la física de los últimos 15 años cabe cifrarlo en el desarrollo de una nueva clase de teorías unificadas para describir las fuerzas que actúan entre las partículas elementales. Hasta que no se introdujeron esas teorías, las cuatro fuerzas observables de la naturaleza parecían independientes entre sí. La fuerza electromagnética gobierna las interacciones de las partículas con carga eléctrica; la nuclear débil es responsable de ciertos procesos, como la desintegración beta de los núcleos atómicos radiactivos; la fuerza nuclear fuerte mantiene unido el núcleo; la gravedad mantiene unido el universo entero. De las nuevas teorías, la más aceptada es la que liga el electromagnetismo y las fuerzas débiles: da a entender que se trata de meras manifestaciones distintas de una sola fuerza subyacente.

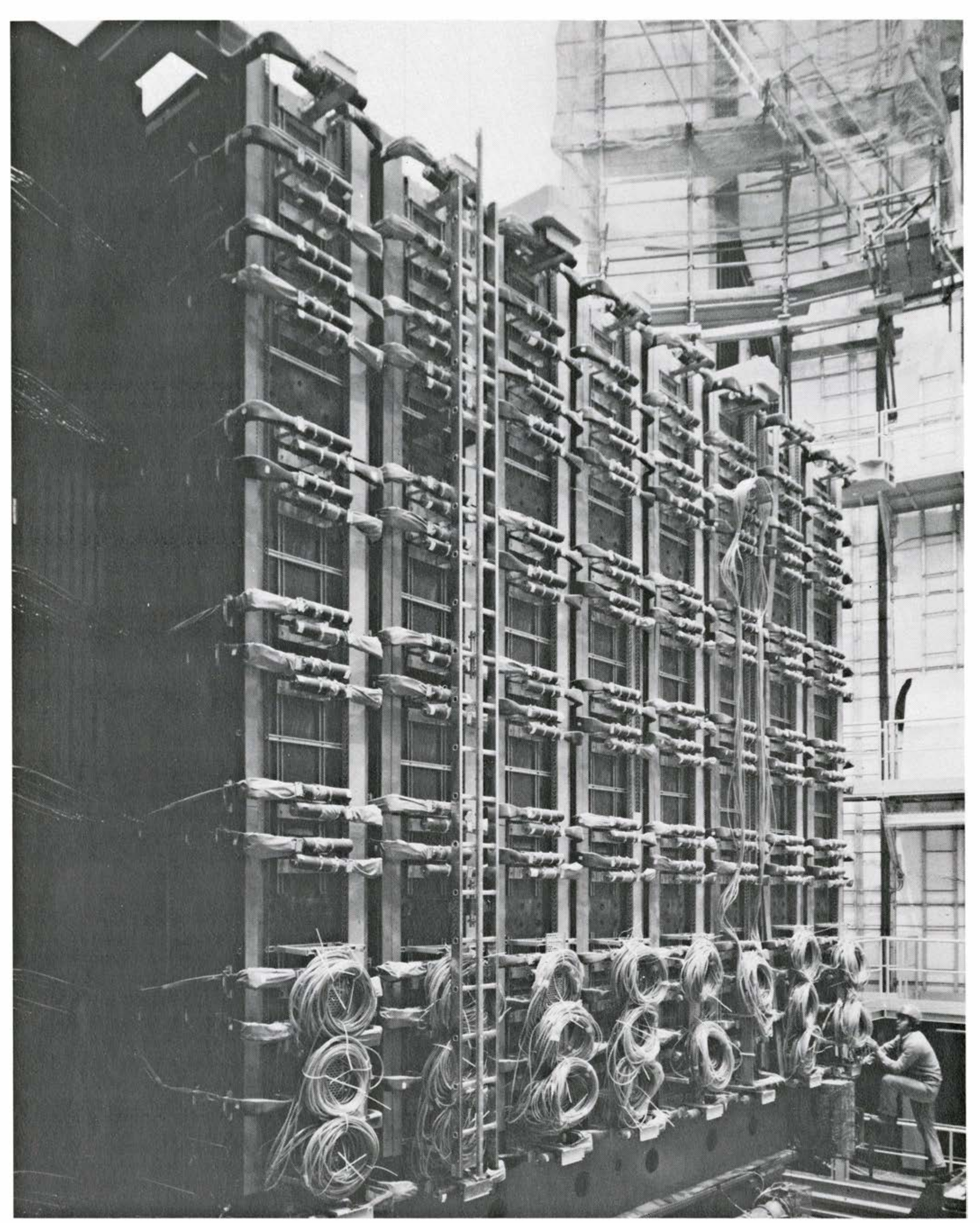
Nos hallamos en puertas de un experimento decisivo en el que se pondrá a prueba la validez de la teoría electrodébil unificada. Predicción crucial de esa teoría es la referente a la existencia de tres partículas dotadas de gran masa, los llamados bosones vectoriales intermedios (y con menos éxito, debilitones). Acaba de finalizar la construcción, en las instalaciones que la Organización Europea para Investigaciones Nucleares (CERN) posee en Ginebra, del primer acelerador de partículas del mundo que alcanzará la energía suficiente para crear esas partículas. Diseñado en un principio para producir choques de protones de alta energía contra un blanco fijo, los cambios inducidos le facultan para un nuevo modo de funcionamiento: aquel en que se hacen chocar frontalmente protones y antiprotones. Esa máquina de colisión de haces acaba de superar las pruebas experimentales y puede empezar a rendir con el nuevo sistema de detección de partículas, muy refinado, que se le ha incorporado. Si los bosones vectoriales intermedios existen, y gozan de las propiedades que les atribuye la teoría electrodébil, no tardarán mucho en detectarse. Se les contempla como el trofeo más codiciado por la física contemporánea; su hallazgo daría remate a una búsqueda de más de 40 años.

Dentro del contexto de las interacciones entre partículas elementales, se sostiene que entre dos partículas interactuantes se transmite la fuerza mediante el intercambio de una tercera partícula, la mediadora. Descripción que constituye la esencia de la teoría cuántica de campos. La idea de un campo que se extiende por el espacio es necesaria para explicar que las partículas actúan mutuamente a distancia; y se trata de un campo cuántico porque está personificado en unidades discretas, a saber, las partículas mediadoras (o intermedias como también las denominaremos). En el ámbito de las interacciones electromagnéticas y débiles la partícula de trueque es un miembro de la familia de los bosones vectoriales. Designación que nos remite a una clasificación de las partículas en razón de una de sus propiedades fundamentales: la de momento angular de spin. Un bosón (nombre que se le concedió en honor del físico indio S. N. Bose) es una partícula cuyo spin, medido en unidades fundamentales, es un entero, vale decir: 0, 1 o 2. El adjetivo "vectorial" califica al bosón de spin 1.

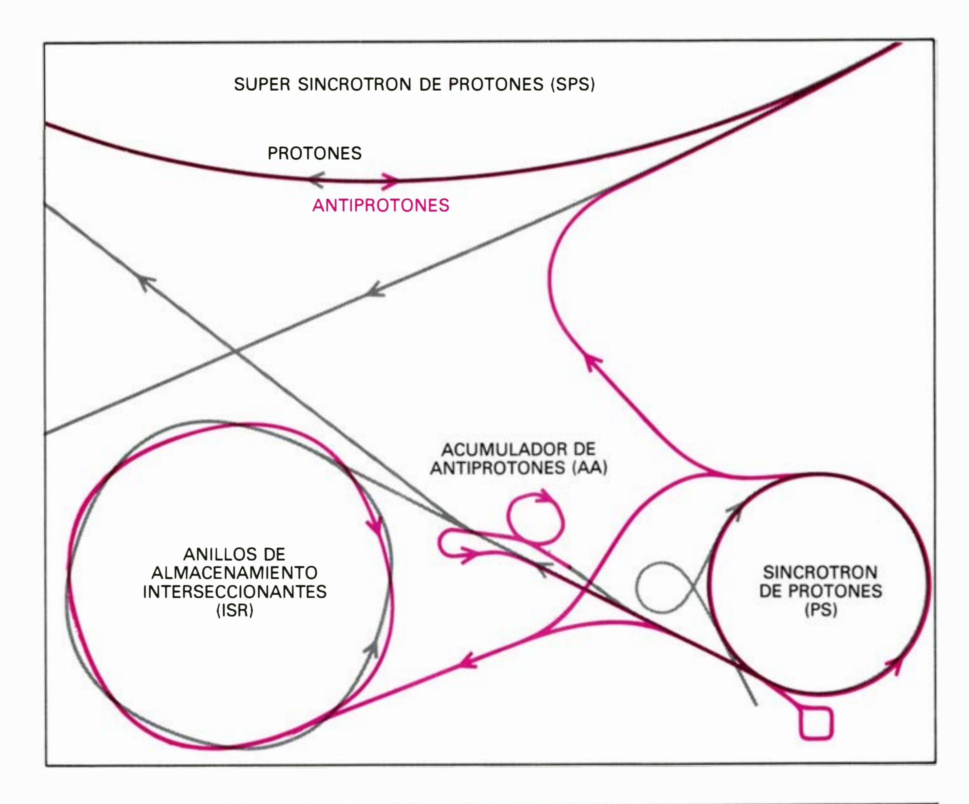
En el caso del electromagnetismo, el bosón vectorial que se intercambia es el fotón, el "paquete de ondas" de energía electromagnética carente de masa y carga que actúa como el cuanto del campo electromagnético. Fácil de observar por vía experimental (en forma de luz, por ejemplo), a partir del estudio de sus propiedades los físicos han construido una teoría de extraordinaria precisión y alcance: la llamada electrodinámica cuántica, que se abrevia por sus iniciales inglesas QED, teoría cuántica de campos de la fuerza electromagnética.

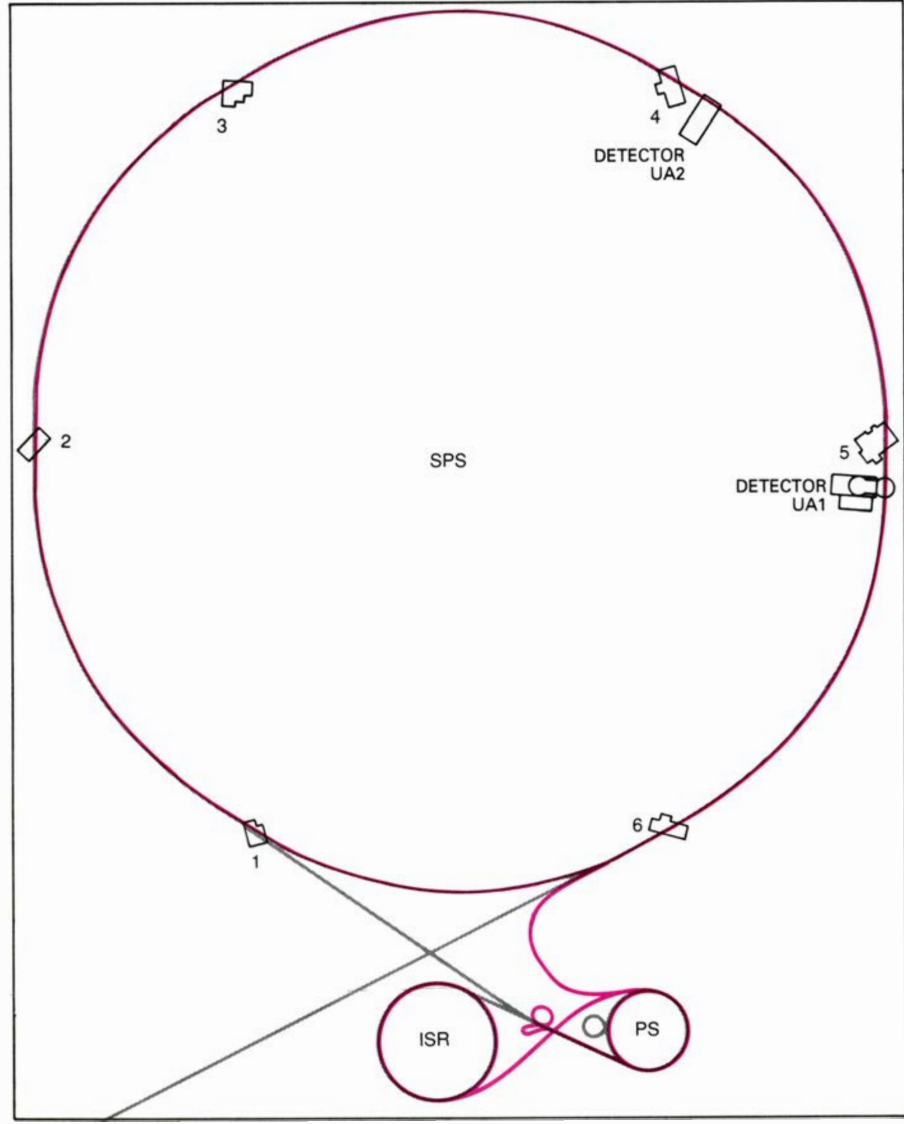
El portador correspondiente de la fuerza en las interacciones débiles es el bosón vectorial intermedio (donde intermedio no significa otra cosa que servir de intermediario entre las partículas). Fue el físico japonés Hideki Yukawa quien primero propuso la existencia de esa partícula, allá por 1935, en su afán por hallar una explicación unificada de las dos fuerzas nucleares que se acababan de descubrir: la fuerte y la débil. Yukawa hizo notar que el alcance de una fuerza tenía que ser inversamente proporcional a la masa de la partícula que la transmitía. Así vemos que el alcance de la fuerza electromagnética es infinito, en concordancia con la falta de masa del fotón. Por contra, las dos fuerzas nucleares presentan un alcance limitado, tienen pues que ir mediadas, razonó Yukawa, por partículas dotadas de masa.

Lo que en concreto postuló Yukawa era la existencia de una partícula moderadamente pesada, que más tarde se denominaría mesón, cuyo intercambio daba origen a la intensa fuerza atractiva entre el protón y el neutrón. La primera partícula de este tipo en identificarse correctamente fue el mesón pi (o pion), que se descubrió en 1947 entre la cascada de partículas secundarias generadas por el choque de una partícula de radia-



NUEVO DETECTOR DE PARTICULAS de la Organización Europea de Investigaciones Nucleares (CERN), que tiene su sede en Ginebra. En su diseño y construcción ha intervenido un equipo formado por más de 100 físicos pertenecientes a 11 instituciones universitarias e investigadoras de Europa y los Estados Unidos. Se espera poder llegar a la primera observación de un bosón vectorial intermedio con la ayuda de este aparato. Se trata de un gran detector de uso plural. Bautizado con las siglas UA1 ("*U*nderground *A*rea One", área subterránea uno), aparece aquí estacionado en su "garaje", adyacente al mayor acelerador de partículas de que dispone el CERN: el Super Sincrotrón de Protones (SPS), transformado recientemente en máquina de colisión de haces protón-antiprotón a sugerencia de dos de los autores. Cuando ha de entrar en funcionamiento, se le conduce sobre unos raíles hasta su puesto en el camino de los haces que colisionan. El equipo electrónico cubre la parte exterior del detector, impidiéndonos ver las cámaras centrales de detección.





ción cósmica con un átomo de la atmósfera. Los aceleradores permiten hoy producir mesones en número elevadísimo.

Se supone que las partículas de los núcleos, mesones incluidos, están compuestas por constituyentes más fundamentales llamados quarks. Los quarks se encuentran ligados entre sí por la fuerza fuerte, pero en su contexto la fuerza adquiere una forma enteramente distinta de la que se observa entre protones y neutrones. Esa fuerza que media entre quarks viene transmitida, según se cree, por la familia de ocho bosones vectoriales carentes de masa: los gluones. A los quarks y a los gluones se les asigna una propiedad, denominada arbitrariamente "color", que desempeña, con relación a las interacciones fuertes, el mismo papel que cumple la carga eléctrica en el ámbito de las interacciones electromagnéticas. Prosiguiendo con la analogía, la teoría cuántica de campos de la fuerza fuerte se llama cromodinámica cuántica, o QCD (sus iniciales en inglés).

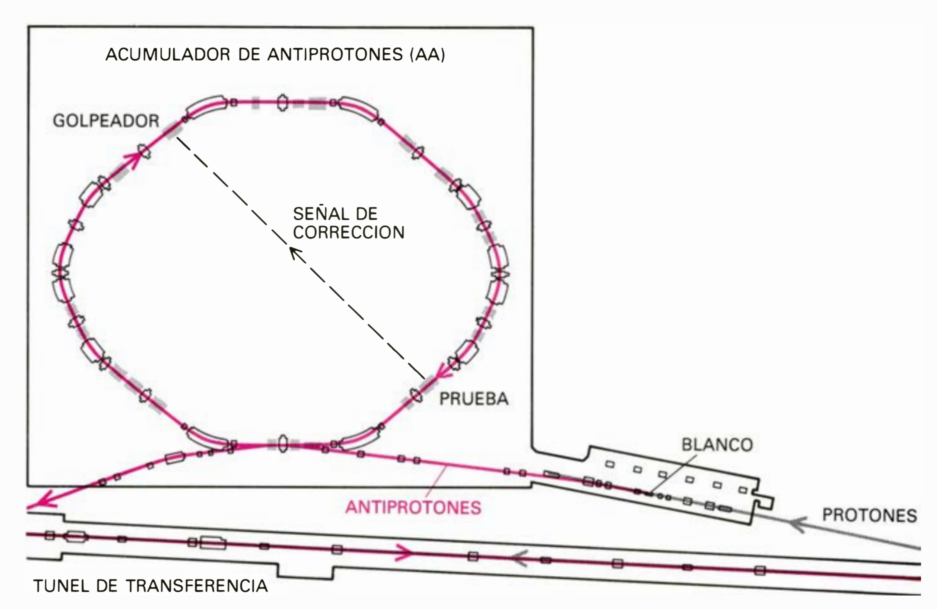
La fuerza nuclear débil tiene un alcance todavía más corto que el que posee la fuerza fuerte que media entre protones y neutrones. De ahí que se espere que los bosones vectoriales intermedios de las fuerzas débiles presenten una masa mayor que la del mesón pi. Fracasaron los primeros intentos por detectar las partículas mediadoras asociadas con la fuerza débil, debido, probablemente, a la mayor masa de esos bosones, que los ponía fuera del alcance de los aceleradores de partícu-

HACES de protones y antiprotones que giran en sentido contrario. Se generan en el CERN como productos finales de una secuencia de sucesos que transcurren en varios anillos de aceleradores interconectados. Se empieza por acelerar un haz de protones (*gris*) a una energía de 26 GeV (un gigaelectronvolt equivale a mil millones de electronvolt) en el Sincrotrón de Protones (PS). Se hace incidir luego los protones contra un blanco de metal, produciendo, entre otras cosas, antiprotones con una energía de 3,5 GeV. Se recogen y transfieren los antiprotones (*color*) a un Acumulador de Antiprotones (AA), donde se combinan con otros antiprotones que se han inyectado antes y se concentran en "paquetes" densos que contienen varios centenares de miles de millones de partículas, cada uno. Se devuelven los antiprotones al anillo del PS, donde se aceleran hasta 26 GeV. Los antiprotones de 26 GeV se inyectan luego en el anillo del SPS; hay allí protones de la misma energía circulando ya en sentido opuesto. Uno y otro haz reciben una aceleración de 270 GeV en el anillo mayor. El plano general del lugar (*dibujo inferior*) muestra la localización de los nuevos detectores de partículas, situados en dos largos tramos rectos del anillo del SPS donde los haces que giran en sentidos opuestos terminarán por chocar. Los restantes anillos recogidos aquí se destinan a otros tipos de experimentos.

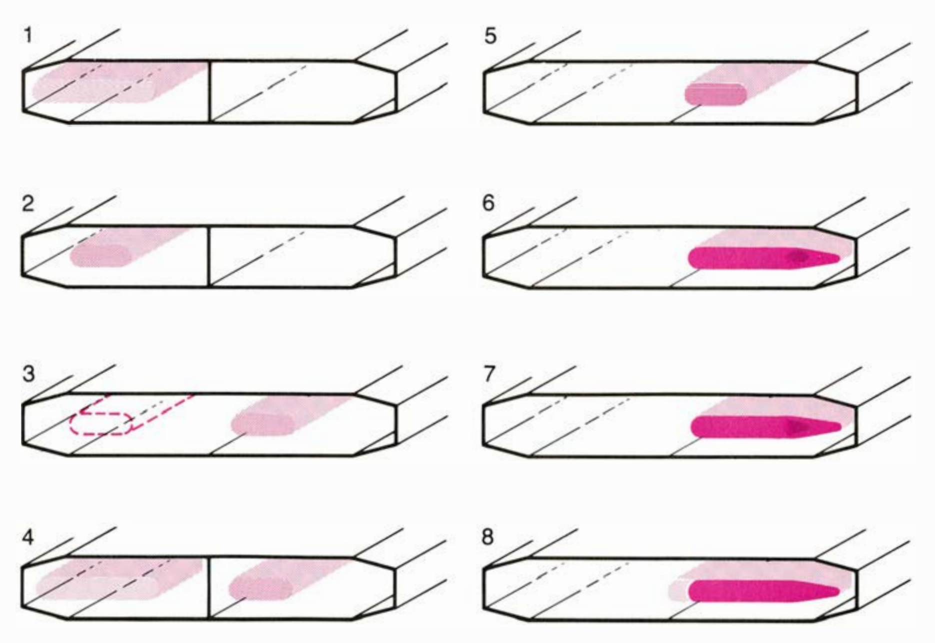
las en funcionamiento. La verdad es que hasta el advenimiento de la teoría unificada electrodébil, que ocurrió en las postrimerías de los años sesenta y principios de la década siguiente, no se disponía de cálculos fiables acerca de la masa de las partículas causantes de las fuerzas débiles.

En el desarrollo de la teoría electrodébil intervinieron, independientemente, Steven Weinberg, de la Universidad de Harvard, y Abdus Salam, del Centro Internacional de Física Teórica de Trieste, con la aportación destacada de Sheldon Lee Glashow, de Harvard, y otros. La teoría, que podríamos considerar ya la descripción standard de las interacciones electromagnéticas y débiles, establece por vez primera predicciones específicas y comprobables sobre las propiedades de los bosones vectoriales intermedios, incluyendo su masa. La teoría requería, además, la existencia de tres partículas de éstas, con cargas eléctricas + 1 (el W^+), − 1 (el W^-) y cero (el Z^o). La estimación más ajustada de la masa de los bosones vectoriales intermedios la cifra en 79,5 GeV para el W^+ y el W^- y en 90 GeV para el Z^o. (La abreviatura GeV corresponde a gigaelectronvolt, esto es, 1000 millones de electronvolt. La masa de un protón equivale a un GeV.)

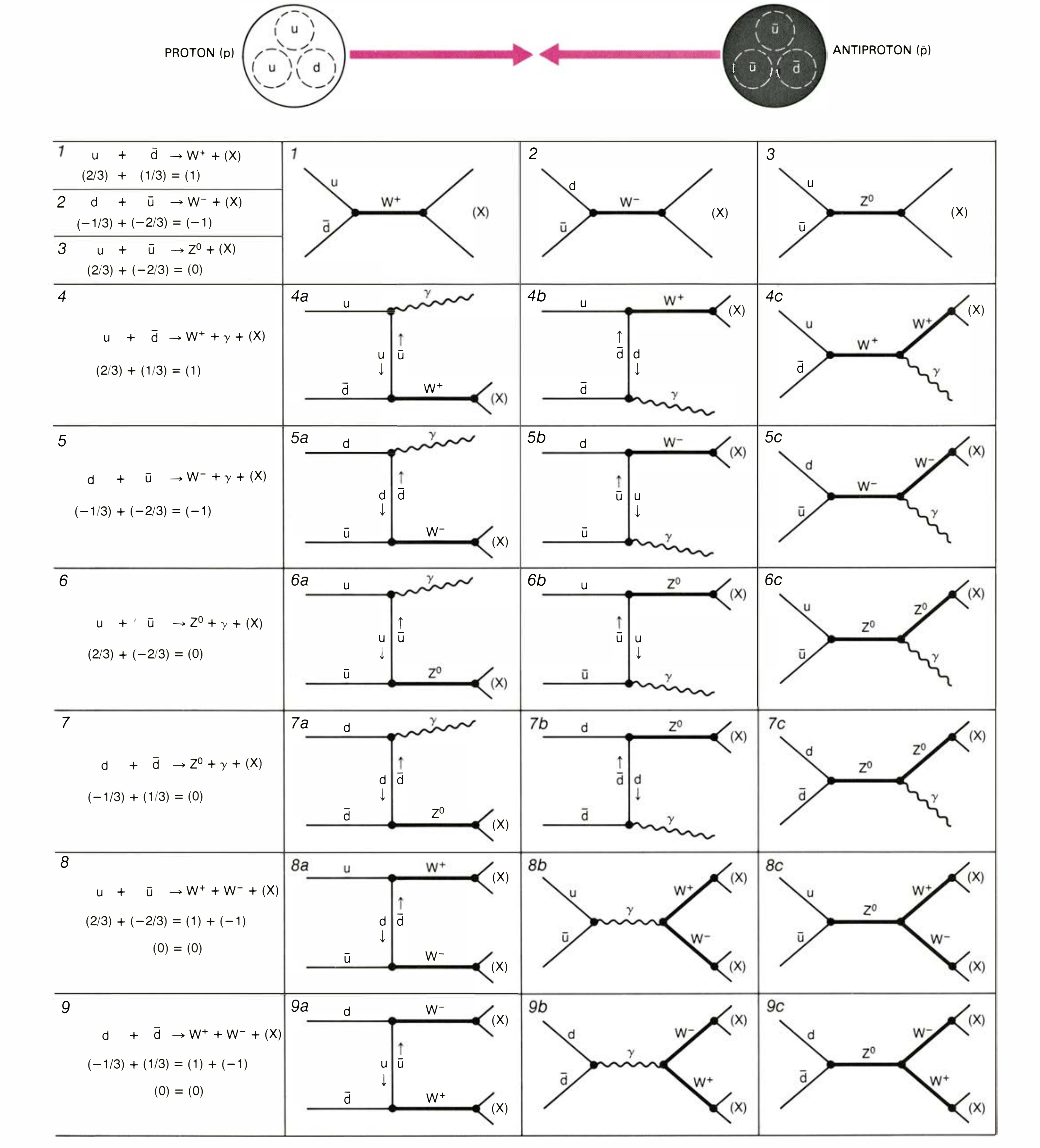
La teoría standard se funda en la siguiente idea central: el electromagnetismo y la fuerza débil emanan ambos de una sola propiedad, más fundamental, de la materia. Y así deberá ocurrir que a energías extraordinariamente altas (lo suficiente para que las partículas *W* y *Z* se produjeran con la facilidad con que se crean los fotones) los sucesos mediados por una y otra fuerza resultarán indistinguibles. Unificación teórica que se cumple al asignar a la misma familia de cuatro partículas el fotón y los bosones vectoriales intermedios. Pero a las energías que nos son accesibles hoy, no cabe duda de que los sucesos electromagnéticos difieren de los débiles. Más aún, se diría que el fotón y las partículas *W* y *Z* son hermanos muy distintos, ya que el primero carece de masa y los otros tres se cuentan entre las partículas más pesadas de las que se tenga noticia o sospecha. ¿Cómo explicar esa divergencia? La teoría standard recurre para ello a la noción de ruptura de la simetría, que va discriminando las fuerzas a medida que disminuye la energía, de un modo análogo a lo que acontece cuando una sustancia se separa en dos fases distintas si bajamos la temperatura.



AL ACUMULADOR DE ANTIPROTONES compete realizar dos funciones esenciales en los experimentos de colisión de haces del CERN: "almacenar" los paquetes de antiprotones que se van inyectando y "enfriarlos" por un proceso estadístico llamado de enfriamiento estocástico. Para cumplir esta segunda misión, el anillo incorpora cierto número de aparatos de "prueba" y "golpeadores" (*figuras en gris*), amén de los imanes que harán cambiar la dirección del haz y enfocarlo, normales en cualquier anillo de almacenamiento (*figuras con interior blanco*). En el enfriamiento estocástico, un aparato de prueba en una sección del anillo de almacenamiento mide la desviación media, respecto de la órbita ideal, de las partículas; se remite entonces una señal correctora a un golpeador sito al otro lado del anillo, llegando justo a tiempo para obligar a la partícula a que reemprenda la órbita ideal. Se recoge aquí uno de esos enlaces.



ALMACENAJE Y ENFRIAMIENTO de antiprotones en el anillo AA, ilustrados en esta secuencia de diagramas de sección transversal. Se comienza por inyectar un paquete de unos 20 millones de antiprotones en un anillo; se le obliga a circular por la parte externa de una cámara de vacío de amplia apertura (*1*). Durante la inyección, este espacio queda aislado del resto de la cámara por un obturador metálico que se acciona mecánicamente. Las partículas inyectadas sufren un pre-enfriamiento por el método estocástico a lo largo de un intervalo de dos segundos, reduciendo su movimiento aleatorio en un factor de 10, tanto en dirección longitudinal como transversal (*2*). Se baja entonces el obturador. Los antiprotones, pre-enfriados ya, son movidos magnéticamente en la posición de almacenaje, en el cuerpo principal de la cámara (*3*). Se levanta de nuevo el obturador. Se inyecta un segundo paquete de antiprotones 2,4 segundos después del primero (*4*). El segundo paquete se ve sometido al mismo proceso, terminando en el acumulador después de su pre-enfriamiento (*5*). Una hora más tarde, cuando se llevan inyectados 1500 paquetes y pre-enfriados y almacenados unos 30.000 millones de antiprotones, comienza a formarse en el acumulador un núcleo denso (*6*). 40 horas más tarde, cuando se han inyectado 60.000 paquetes, hay girando en el acumulador la friolera de un billón de antiprotones, la mayoría de ellos concentrados en el núcleo (*7*). Entran entonces en acción campos magnéticos para sacar el núcleo, obteniéndose unos 600.000 millones de antiprotones para los experimentos de colisión de haces. Los 400.000 millones restantes permanecen almacenados en el anillo de AA, disponibles para iniciar la formación del núcleo siguiente (*8*). Pasados otras 24 horas, se habrá enfriado el segundo núcleo de 600.000 millones de antiprotones y se hallará listo para la inyección. En todos los casos, la parte interior del anillo se encuentra a la derecha.

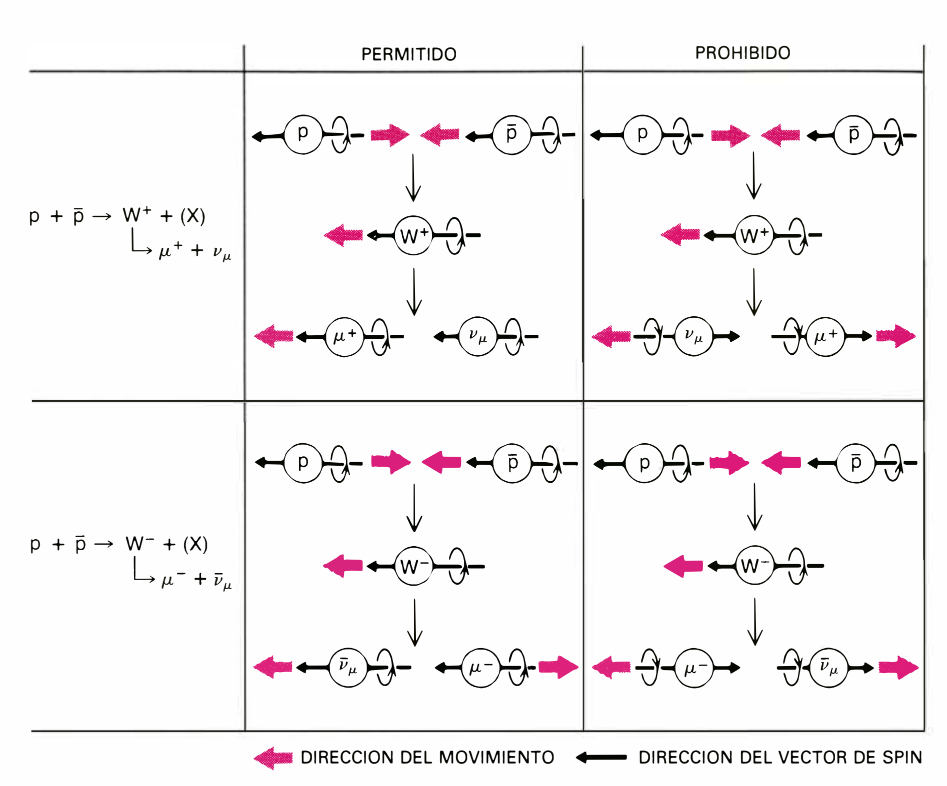


SE ESPERA QUE APAREZCAN nuevas partículas, como resultado de las colisiones de alta energía protón-antiprotón, cuando un quark perteneciente a la estructura del protón interactúe con un antiquark de la estructura del antiprotón. Como nos indica el dibujo idealizado que encabeza esta ilustración, se supone que el protón consta de dos quarks "hacia arriba" ("up", *u*) y otro "hacia abajo" ("down", *d*), en tanto que al antiprotón se le asignan dos antiquarks "anti-arriba" ($\bar{u}$) y otro "anti-abajo" ($\bar{d}$). Las interacciones quark-antiquark que pueden contribuir a la producción de bosones vectoriales intermedios se representan simbólicamente a la izquierda y diagramáticamente a la derecha. Se han postulado tres bosones vectoriales intermedios: dos partículas cargadas (denominadas W^+ y W^-) y una partícula eléctricamente neutra (Z^0). De las tres se espera que tengan una vida media brevísima, razón por la que sólo quepa detectarlas a través de sus productos de desintegración, que aquí representamos de forma global y genérica por *X*. La primera fila muestra los tres procesos más probables. Las cuatro siguientes presentan procesos en los que los bosones vectoriales intermedios se crean junto con fotones energéticos (γ). Las dos últimas filas describen procesos en los que se forman pares de bosones vectoriales intermedios. (Cuando aparecen partículas que se mueven en ambos sentidos a lo largo de una línea vertical la interacción puede proceder por cualquiera de los mecanismos.) Los números entre paréntesis escritos debajo de los símbolos (*izquierda*) dan la carga eléctrica de cada partícula; las ecuaciones demuestran que en todo caso se conserva la carga.

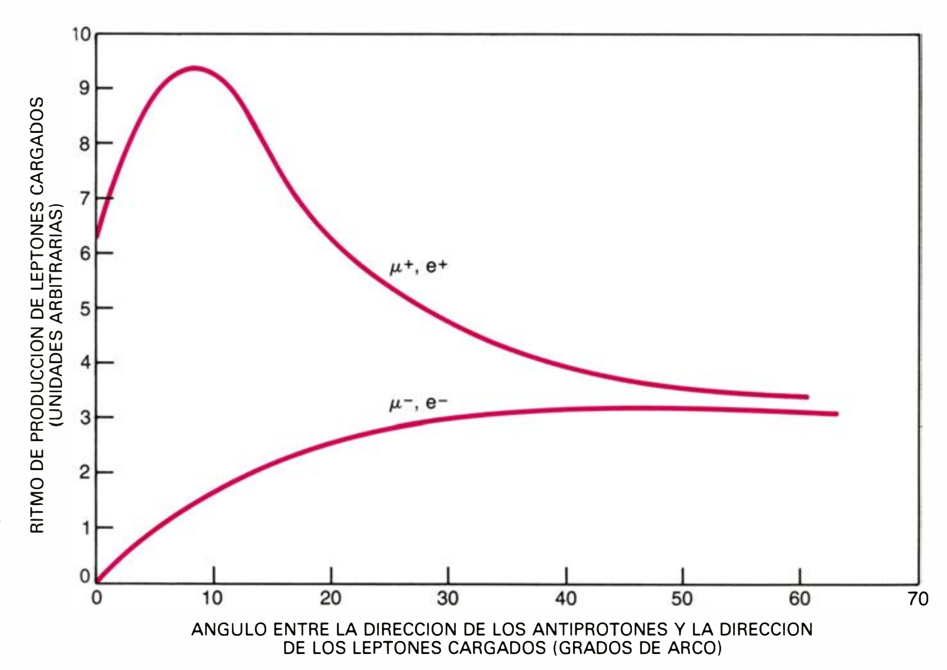
Para entender la teoría unificada electrodébil podemos empezar por considerar un estado primordial imaginario donde fotones y bosones vectoriales intermedios carezcan de masa. La ruptura de una simetría de la naturaleza hizo que el W^+, el W^- y el Z^o adquirieran una masa grande, mientras que el fotón siguió carente de ella. En 1964 Peter Higgs, de la Universidad de Edimburgo, examinó ya un mecanismo para discriminar así entre los portadores de las fuerzas. Curiosamente, el llamado mecanismo de Higgs puede dar masas a las partículas *W* y *Z* con sólo postular la existencia de otra partícula dotada también de masa, y a la que se ha bautizado como bosón de Higgs. Se la busca junto con los bosones vectoriales intermedios.

La teoría electrodébil recibió un importante apoyo experimental en un descubrimiento realizado en 1973 en el CERN y en el Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab), cerca de Chicago. Hasta entonces, todas las interacciones débiles de la materia conocida involucraban el intercambio de carga eléctrica. Un protón, por ejemplo, podía dar su carga de + 1 a un neutrino (partícula sin masa ni carga); a raíz de ello el protón se transforma en neutrón y el neutrino se convierte en positrón, o antielectrón. Ahora, todos esos sucesos pueden explicarse mediante intercambio de los bosones vectoriales intermedios dotados de carga W^+ y W^-. ¿Qué se halló en 1973? Los experimentos aludidos demostraron la existencia de interacciones débiles en las que las partículas mantenían las mismas cargas que poseían antes del suceso, tal como ocurría en las interacciones electromagnéticas. Una interacción débil de este tipo podía explicarse sólo por el intercambio de un bosón vectorial intermedio neutro (la partícula Z^0), o, a través de una descripción equivalente, mediante la intervención de una corriente débil neutra. En 1979, los profesores Weinberg, Salam y Glashow recibieron el Nobel de física por "sus contribuciones a la teoría unificada de las interacciones débiles y electromagnéticas entre partículas elementales, incluyendo... la predicción de la corriente débil neutra".

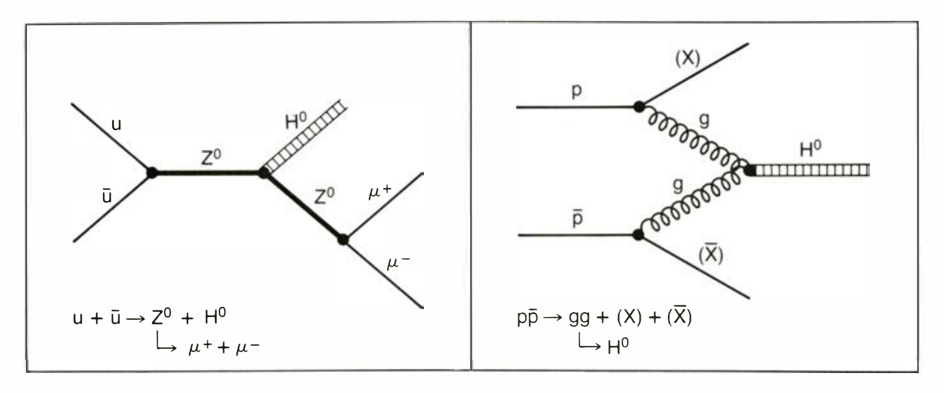
Una vez confirmada de plano la existencia de corrientes débiles neutras resultaba natural del todo hacer un esfuerzo por hallar un método que permitiera detectar las partículas Z^0, W^+ y W^-. Mas no parecía muy aleccionador que digamos ponerse a crear partículas de masa tan grande. Los mayores ace-



DIRECCION DEL SPIN de las partículas que intervienen en la producción y desintegración de los bosones vectoriales intermedios. Dirección que tiene un efecto importante en la propia dirección del movimiento de los productos de la desintegración. Resulta de ello una asimetría en el ritmo con que se espera observar los leptones cargados en sentidos distintos de los que portan los haces incidentes. (Los leptones son partículas tales como el electrón y el muon que participan en las interacciones débiles pero no en las fuertes.) Así, cuando un bosón vectorial intermedio cargado (W^+ o W^-) se desintegra para formar un muon (μ^+ o μ^-) y un neutrino de tipo muónico (ν_μ o $\bar{\nu}_\mu$), la mayoría de los muones cargados positivamente dejan la colisión en la dirección del haz de protones entrante (aquí a la izquierda y derecha, respectivamente). La observación de este efecto, privativo de las fuerzas débiles, debería considerarse como una prueba firme de la evanescente existencia de bosones cargados entre los productos de la desintegración.



ASIMETRIA PREVISTA EN LA DISTRIBUCION ANGULAR de los leptones cargados que salgan de las colisiones protón-antiprotón en las que se originen bosones vectoriales intermedios dotados de carga. La ilustración recoge el ritmo de producción teórico de mesones cargados para varios ángulos con relación a la dirección del haz de antiprotones. El efecto alcanza su mayor intensidad en la dirección hacia delante (es decir, a pequeños ángulos en relación a la dirección de los antiprotones). Se espera que electrones (e^-), positrones (e^+) y muones contribuyan a ese efecto, aun cuando electrones y positrones interaccionen con los materiales del detector de un modo más fácil que los muones y se detecten más de tanto en cuanto. Los puntos correspondientes a las dos curvas se calcularon para colisiones protón-antiprotón a una energía total de 2000 GeV, meta que tiene fijada la máquina de colisión de haces en fase de construcción en el Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab), sito en las proximidades de Chicago.



TAMBIEN PUEDE APARECER EL BOSON DE HIGGS en los experimentos de colisión de haces del CERN y el Fermilab. Se considera el descubrimiento de esta partícula (simbolizada por H^0), que carece de carga pero no de masa, como la prueba definitiva de la teoría unificada standard que liga las interacciones electromagnéticas y las interacciones débiles. Se dibujan arriba dos procesos que pueden resultar en la producción de bosones de Higgs. A la izquierda se crea un bosón de Higgs junto con un bosón vectorial intermedio. A la derecha, el bosón de Higgs se origina por fusión de dos gluones emitidos en una colisión rasante entre un protón y un antiprotón. (Se llaman gluones a las partículas que median entre las interacciones fuertes, las que se dice que mantienen ligados los quarks de las partículas del núcleo.)

leradores de partículas que operaban por entonces eran aparatos en los que se aceleraba, a altas energías, un haz de protones para hacerlo incidir luego contra un blanco fijo. En la colisión producida entre una partícula del haz contra otra del blanco, la mayor parte de la energía liberada se consumía en mover el sistema formado por las dos partículas más que en destruirlo. Sólo restaba disponible para crear nuevas partículas una fracción pequeña de la energía del haz. La única posibilidad de llegar a observar un bosón vectorial intermedio, parecía claro, sería acudir a una máquina de colisión de haces, donde las partículas aceleradas chocaran frontalmente, transformándose toda su energía, o casi toda, en nuevas partículas.

Llevaban ya varios años en funcionamiento anillos de almacenamiento de electrones y positrones. La ventaja extraordinaria que presentaba el uso de electrones y positrones radicaba en que bastaba un solo anillo de imanes y de cavidades de radiofrecuencia para acelerar simultáneamente una partícula y su antipartícula en sentidos opuestos, de suerte que se formaran haces que girasen contrapuestos en el interior de una única cámara de vacío en forma de rosquilla. Mas como electrones y positrones eran muy ligeros, disipaban en seguida su energía cuando se les obligaba a seguir un camino curvado en el anillo de almacenamiento. No parecía plausible por aquellas fechas construir un acelerador electrón-positrón que fuera lo suficientemente grande para alcanzar la energía de los bosones vectoriales intermedios. Había un plan alternativo: construir anillos de almacenamiento en los que chocaran frontalmente protones contra protones; para llevar a cabo esas colisiones se necesitaban dos anillos entrelazados. De acuerdo con la programación de ese tipo de construcciones no se esperaba que la primera máquina protón-protón entrara en funcionamiento antes de la mitad de nuestra década.

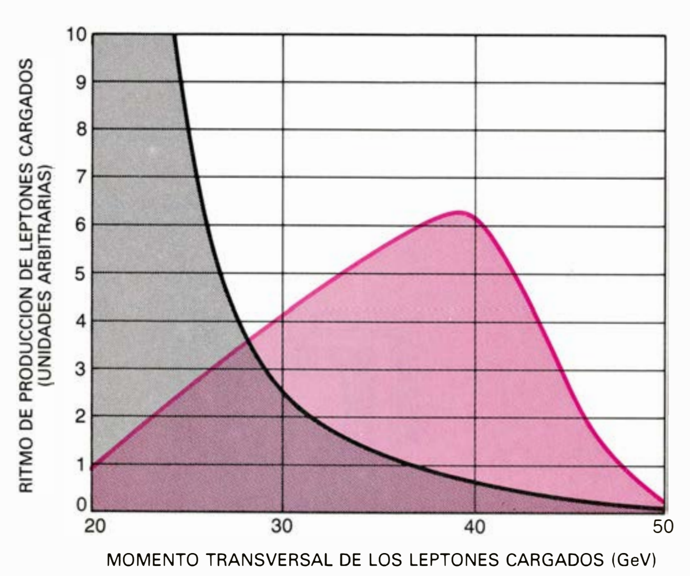
Pero ya en 1976 a dos de los autores de este artículo (Cline y Rubbia) se nos ocurrió un proyecto alternativo: en vez de levantar un acelerador totalmente nuevo de colisión de haces, propusimos la viabilidad (y menor coste) de convertir un acelerador de protones de blanco fijo de los que ya existían en una máquina de colisión de haces. ¿Cómo? Generando un haz de antiprotones que circularan en sentido opuesto en el mismo espacio anular ocupado por el haz de protones original. Nuestra sugerencia fue bien acogida. Tras un exhaustivo análisis de los problemas que habrían de plantearse a lo largo del proyecto, se decidió construir máquinas protón-antiprotón en dos de los mayores aceleradores de protones del mundo: el Super Sincrotrón de Protones (SPS), del CERN, que empezó a funcionar a una energía máxima de 400 GeV en 1976, y una versión más avanzada de un acelerador equiparable sito en el Fermilab, todavía en fase de proyecto por aquel entonces.

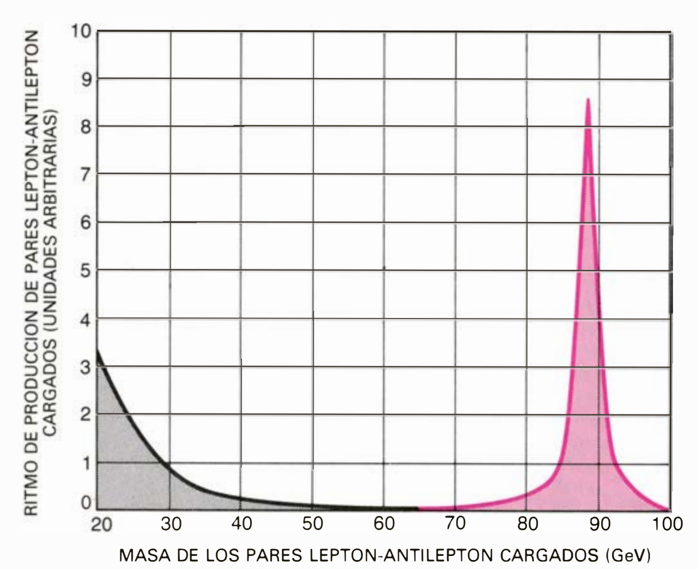
La conversión del aparato del CERN resultaba, en muchos aspectos, más asequible, y terminó el verano pasado. Estuvo al frente de la misma Roy Billinge y uno de los autores (van der Meer). Las primeras colisiones protón-antiprotón a la energía máxima prevista de 270 GeV por haz se observaron en julio. A finales de diciembre, cuando se paró la máquina por las vacaciones de Navidad, se llevaban registradas más de 250.000 de tales colisiones. Y el ritmo relativamente bajo con que se espera que se produzcan bosones vectoriales intermedios en las colisiones protón-antiprotón explica por qué no se ha detectado todavía ninguno de ellos en esas pruebas iniciales. Situación que suponemos cambiará radicalmente en la próxima tanda de experimentos, cuando la intensidad de partículas de los haces, y por ende la tasa de colisiones, aumente en un orden o más de magnitud.

La gran máquina de colisión de haces protón-antiprotón del Fermilab se halla todavía en fase de construcción. Entrará en funcionamiento, de cumplirse lo previsto, en 1985. Puesto que se la diseñó, en su origen, para acelerar un haz de protones a una energía de 1 TeV, es decir, un billón de electronvolt, recibió el nombre de Tevatrón. En su metamorfosis en máquina de colisión de haces producirá colisiones, cabe esperar, con una energía total de 2TeV (o sea, 2000 GeV), muy por encima pues de los 540 GeV de la máquina del CERN. Una vez finalizado el ingenio del Fermilab, se convertirá en el primer gran acelerador que emplee un anillo de imanes superconductores.

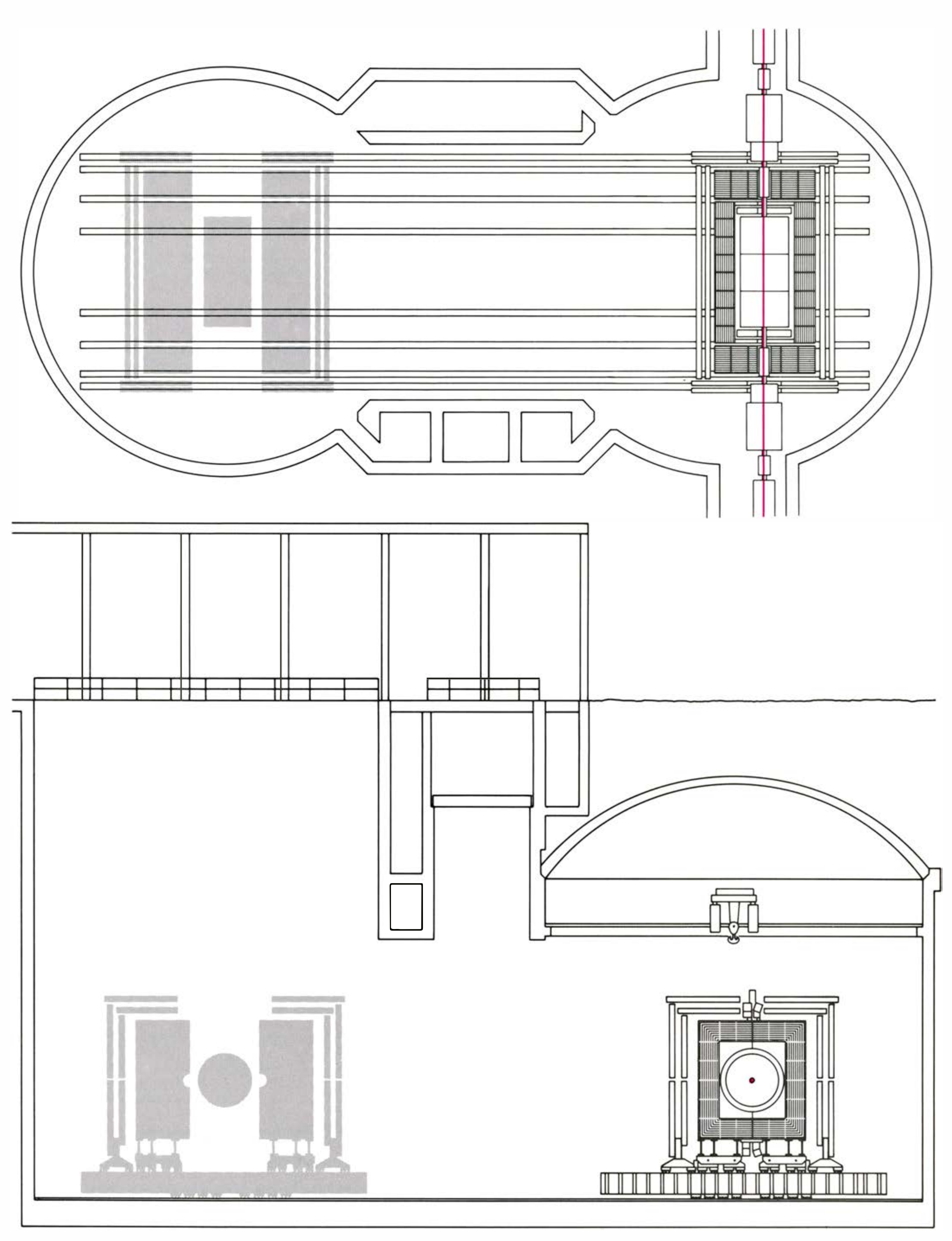
¿Cómo hay que arreglárselas para generar haces opuestos de materia y antimateria en un anillo de almacenamiento? La parte más difícil en los dos casos actuales es acumular un “paquete” de antiprotones lo suficientemente denso que permita asegurar un gran número de colisiones con los protones que les vienen girando en sentido opuesto. A diferencia de los protones, no hay medio fácil de recabar antiprotones de ninguna fuente natural. Hay que crearlos, a su vez, en colisiones de alta energía. ¿Cómo? Se dirige un haz de protones de alta energía contra un blanco metálico; los antiprotones que se crean a raíz de las colisiones contra los átomos del blanco son dirigidos, con ayuda de campos magnéticos, hacia un anillo de almacenamiento diseñado a propósito. Se trata de un proceso de muy pobre rendimiento; en promedio, por cada millón de protones de alta energía que chocan contra el blanco viene a producirse un antiprotón de baja energía. Para hacernos una idea de lo que significa ese ritmo de producción, pensemos que para obtener un número útil de colisiones protón-antiprotón en la máquina de choque de haces del CERN hay que recoger paque-

TASAS DE PRODUCCION ESTIMADAS para bosones vectoriales intermedios y bosones de Higgs en razón de distintos procesos de colisión. Varían en función de la energía total de los haces que entran en colisión. Las curvas indican el ritmo calculado para cada proceso por día de operación a la tasa de colisión proyectada para las máquinas de colisión de haces del CERN y el Fermilab. (La tasa o ritmo real será menor por causa de distintos efectos experimentales de fondo.) Las dos líneas verticales grises señalan la energía total prevista para las colisiones protón-antiprotón en el CERN y en el Fermilab. Se espera que los procesos que resulten de la producción de un bosón vectorial intermedio, cargado y acompañado de un fotón energético, sirvan de indicadores muy sensibles de las propiedades magnéticas de las partículas W^+ y W^-. Los procesos en que se produce un bosón de Higgs por fusión de dos gluones presentan un ritmo de producción más difícil de predecir que los otros procesos, por cuyo motivo se representa por un intervalo de valores.





SEÑALES INDICADORAS de la producción de bosones vectoriales intermedios (*color*) sobresaldrán, así se espera, de entre el "ruido" de fondo (*gris*), particularmente a grandes ángulos con respecto a la dirección del haz. La gráfica de la izquierda muestra el espectro de masas calculado para los leptones cargados que se emitirían, con un gran momento transversal, en las colisiones protón-antiprotón, choques donde se crean bosones vectoriales intermedios. El pico de la señal, predice la teoría, aparecerá cerca de la mitad de la masa calculada de un bosón vectorial intermedio cargado. El ritmo de fondo de leptones nacidos de otras fuentes relacionadas con el proceso de colisión carece de pico y es más bajo que el ritmo, asimismo esperado, de las desintegraciones de las partículas W^+ y W^-. La gráfica de la derecha muestra el espectro de masas calculado para la desintegración del bosón vectorial intermedio neutro en un par de leptones cargados. Tiene el espectro, en este caso, un pico cerca de la masa predicha de las partículas Z^0 (90 GeV). Por ser despreciable el ruido de fondo, se trata del proceso en que hay mayor probabilidad de que se descubra Z^0. (La masa del protón equivale a 1 GeV.)



INSTALACION DEL DETECTOR UA1 en una estancia experimental subterránea, a 25 metros de profundidad. Tanto en su visión en plano (*esquema superior*) como en su visión en planta correspondiente (*esquema inferior*), la línea negra dibuja su posición cuando opera montado sobre el haz del SPS y, la tonalidad gris, su ubicación en el garaje, alejado del servicio. El AU1 es, con mucho, el mayor detector que se haya construido nunca para un experimento de colisión de haces. Mide 10 metros de longitud por cinco de anchura. Pesa 2000 toneladas. Su precio se cifra en torno a unos 20 millones de dólares.

tes de antiprotones (y protones) que conste, cada uno de ellos, de 100.000 millones de partículas. Se producen y acumulan repetidamente paquetes de antiprotones cada 2,4 segundos. A ese ritmo se tardará unas 24 horas en acumular algunos centenares de miles de millones de antiprotones para los ensayos de colisión de haces acometidos en el CERN.

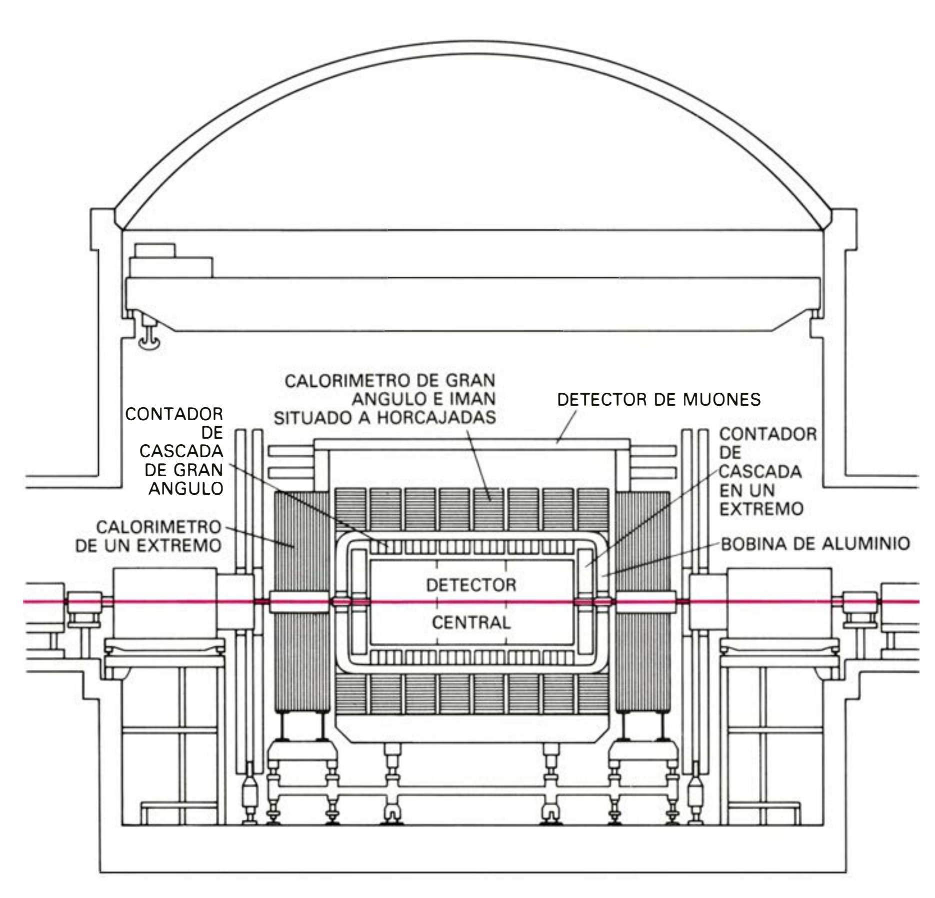
Pero los problemas no se circunscriben a la creación de suficiente número de antipartículas. A medida que los protones van emergiendo del blanco, salen con un amplio abanico de velocidades y direcciones. Contemplados desde su propio sistema de referencia, los antiprotones forman un gas; sus movimientos aleatorios revelan su temperatura. Si ésta es excesivamente alta, habrá partículas que chocarán contra las paredes del acelerador y el haz se disipará. Se exige, pues, algún método para "enfriar" el haz de antiprotones (vale decir, para reducir sus movimientos estocásticos) que lo mantenga lo más concentrado posible antes de que penetre en el anillo del acelerador.

A Gersh I. Budker, del Instituto Soviético de Física Nuclear de Novosibirsk, débese la técnica de enfriamiento del haz que se conoce por enfriamiento por electrones. La propuso hará unos diez años. En líneas generales funciona de la manera siguiente: se mezcla un haz de electrones "frío" (haz en que todas las partículas tienen la misma velocidad y dirección) con otro "caliente" de antiprotones en un breve intervalo espacial. A lo largo del proceso, parte de la energía térmica aleatoria de los antiprotones se transfiere a los electrones. Mezclando repetidamente el haz de antiprotones con nuevos haces de electrones llegan a enfriarse notablemente los antiprotones, si su energía inicial no es demasiado elevada. Y como esta última condición no se cumple en el dispositivo del CERN, pues tiene un haz de antiprotones cuya energía inicial es demasiado alta para que pueda enfriarse de forma adecuada por este método, no se le considera idóneo para dicha finalidad. En el proyecto del Fermilab, sí se halla en estudio la posibilidad de contar con el método de enfriamiento por electrones.

Un método distinto de enfriamiento de haces que se ajustaba mejor a las exigencias de la máquina protón-antiprotón del CERN fue el que inventó en 1968 uno de los autores de este artículo (van der Meer). Se le denomina método de enfriamiento estocástico, dado que se basa en un proceso estadístico. Utiliza una "prueba", o aparato sensor, en una sección del anillo de almacenamiento para medir la desviación media de la órbita ideal que sufren las partículas. La medición se convierte luego en señal correctora, que se transmite a un golpeador instalado en la otra parte del anillo. Este aparato aplica un campo eléctrico a su sección del anillo en el instante debido para que el centro de masa de las partículas transeúntes torne a su órbita ideal. Aunque las partículas corren a una velocidad lindante con la de la luz, la señal correctora llega a tiempo al tomar un camino más corto, que transcurre por una cuerda del anillo de enfriamiento.

Ambas técnicas de enfriamiento, la de Budker y la de van der Meer, han pasado con éxito los ensayos a que fueron sometidas, en los últimos años, en Novosibirsk, CERN y Fermilab. Ello nos permite pronosticar un funcionamiento cabal para los anillos colectores de antiprotones del CERN y el Fermilab. El enfriamiento de haces se está convirtiendo en una parte rutinaria de la tecnología de aceleradores.

En los experimentos del CERN, las partículas atraviesan un complicado rosario de aparatos interconectados que manipulan el haz. Se empieza por acelerar un haz de protones a una energía de 26 GeV en el Sincrotrón de Protones (PS), primer acelerador del CERN cuya obra terminó en 1959. Se dirige luego el haz de protones hacia un blanco de cobre, donde se produce una cascada de partículas, entre las que se aprecian algunos antiprotones con una energía de 3,5 GeV. Se recolectan los antiprotones y se transfieren a un anillo de almacenamiento de apertura amplia: el Acumulador de Antiprotones (AA). Una vez aquí, sufren primero un proceso de enfriamiento por el método estocástico y a continuación se les hace pasar a una órbita menor, donde quedan almacenados junto con los paquetes inyectados antes y prosiguen sometidos a un enfriamiento ulterior. Reunidos ya varios centenares de miles de millones de antiprotones, se les devuelve al anillo del PS, donde se les acelera a 26 GeV antes de inyectarlos en el SPS. Contemporáneamente a ello, se inyectan protones de 26 GeV del PS en el anillo del SPS en sentido opuesto. Los haces que giran ahora en sentidos contrarios reciben una aceleración final a 270 GeV cada uno en el anillo del SPS. Haces que chocarán en dos regiones de interacción, donde se encuen-



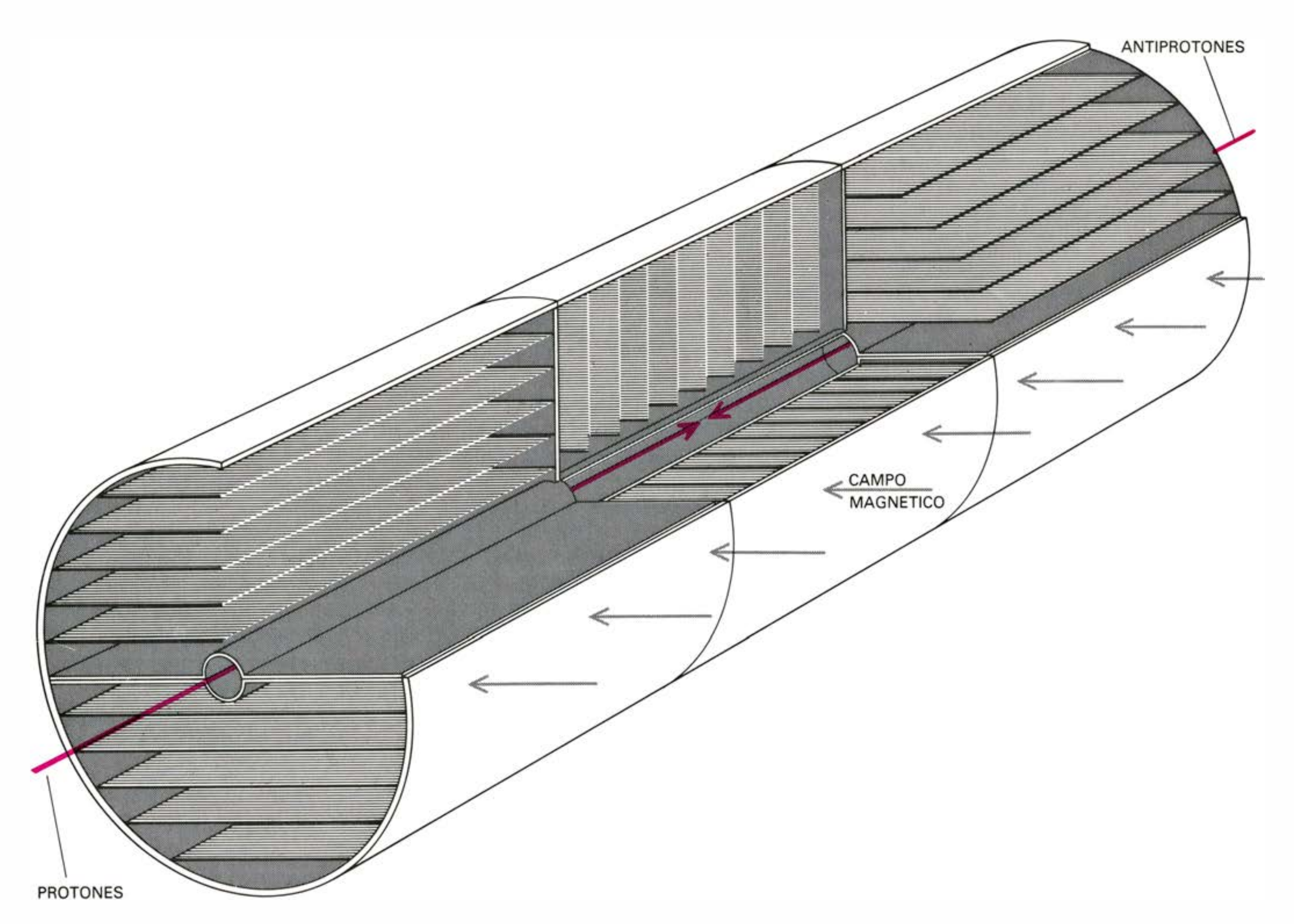
VISTA LATERAL del UA1 instalado en la posición que ocupa en el haz del SPS. Se señalan los distintos componentes con la misión que cumplen, incluida la búsqueda de bosones vectoriales intermedios.

tran los grandes detectores de partículas [*véase la ilustración de la página 18*]. Las interacciones son tan raras que la vida media del haz, cifrada en varias horas, no se verá afectada por ellas.

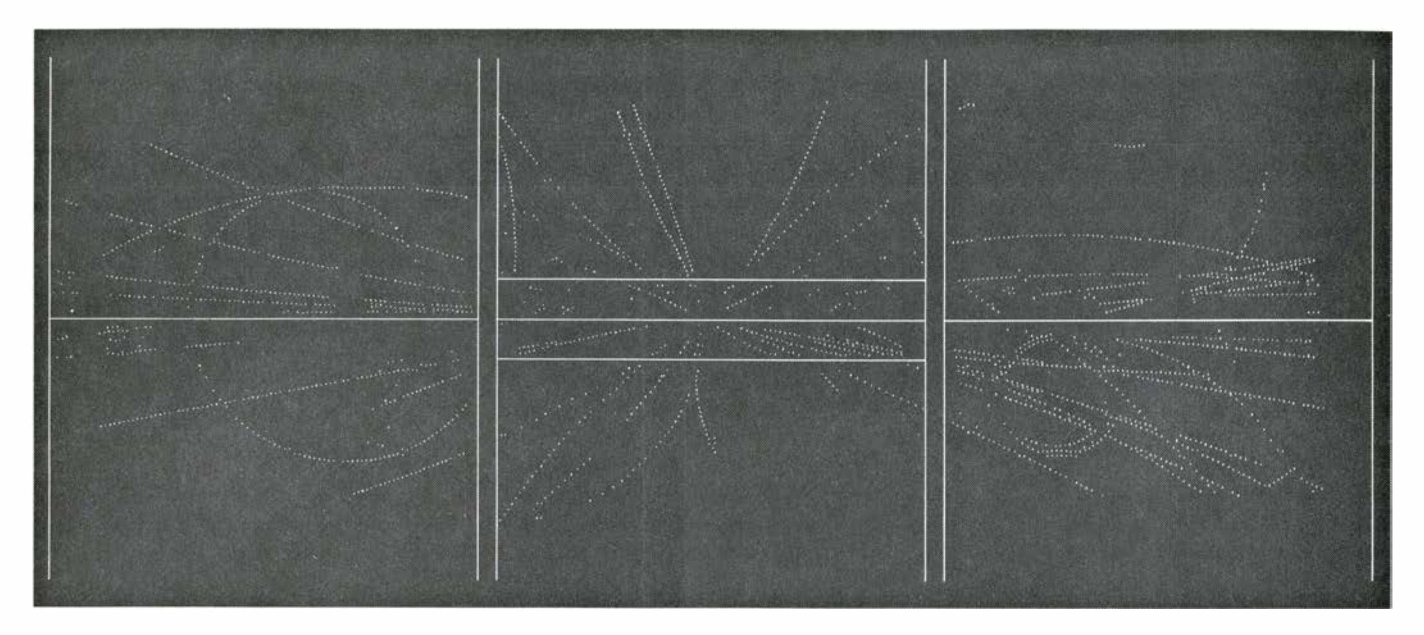
¿Qué hay proyectado en el Fermilab? El plan actual de ese laboratorio norteamericano contempla una fuente de antiprotones más intensa que la que está funcionando en el CERN. En el Fermilab se usarán protones de energía mayor para producir los antiprotones. Hay en estudio varios esquemas alternativos. Debiera recurrirse a una combinación de enfriamiento estocástico y enfriamiento por electrones para acumular 100.000 millones de antiprotones en menos de una hora. Los antiprotones se inyectarán en el anillo del Tevatrón, se acelerarán a una energía de 1000 GeV y habrán de chocar contra protones acelerados asimismo a 1000 GeV y girando en sentido contrario, en dos áreas experimentales. La primera de estas dos, cuya construcción está prevista comience pronto, albergará un detector muy grande.

De acuerdo con la teoría electrodébil, los bosones vectoriales intermedios pueden crearse en las colisiones protón-antiprotón a través de múltiples mecanismos en los que un quark perteneciente a la estructura del protón interactúe con otro antiquark perteneciente a la estructura del antiprotón. Se supone que protón y antiprotón constan de tres partículas. En la caprichosa nomenclatura de la teoría QCD, el protón está formado por dos quarks "hacia arriba" ("up", u) y uno "hacia abajo" ("down", d); el antiprotón está constituido por dos antiquarks "anti-arriba" ($\bar{u}$) y uno "anti-abajo" ($\bar{d}$). Cuando un quark choca contra un antiquark, se aniquilan mutuamente, creando un chorro de energía que puede volver a materializarse como nuevas partículas, bosones vectoriales intermedios incluidos. En unos casos se espera que aparezca un bosón vectorial intermedio tan sólo (acompañado por otras clases de partículas); en otros casos, se predice un par de bosones vectoriales intermedios [*véase la ilustración de la página 20*].

La producción esperada de partículas W^+, W^- y Z^0 en las colisiones de protones con antiprotones varía en función de un parámetro experimental llamado luminosidad, que se define como el número de partículas de alta energía que, por centímetro cuadrado y por segundo, atraviesan la sección recta de la región de interacción. La luminosidad prevista en la máquina del CERN, suponiendo una inyección de 600.000 millones de antiprotones por paquete, se fija en 10^{30} partículas por centímetro cuadrado y por segundo. Con ese mismo número de antiprotones por paquete, la máquina del Fermilab debería alcanzar una luminosidad de 4×10^{30} partículas por centímetro cuadrado y por segundo (merced a su energía más



SISTEMA DE DETECCION CENTRAL del UA1. Consta de tres cámaras de "deriva" cilíndricas, cada una de las cuales contiene una distribución regular de alambres, inmediatos unos a otros, y un gas a baja presión. En las tres cámaras los alambres se extienden horizontalmente. En la central, los alambres horizontales se disponen en planos verticales; y en las dos cámaras que la flanquean, en planos horizontales. La partícula cargada que atraviesa la cámara ionizará las moléculas del gas, éstas se desplazarán luego hacia los alambres y allí depositarán la carga. La distribución de cargas que aparecerán en muchos alambres se registrará eléctricamente, para su posterior análisis mediante ordenador que permita reconstruir la trayectoria de la partícula en la pantalla de un tubo de rayos catódicos. El diámetro de las cámaras mide unos tres metros. Los alambres se mantienen a una distancia de tres milímetros.



REGISTRO VISUAL de una colisión protón-antiprotón ocurrida a finales de 1981 en el sistema central de detección del UA1. Se realizó fotografiando una imagen generada por ordenador. Se trata del mismo suceso que aparece en la portada de este número de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA. De momento, el ordenador lleva registrados ya más de 250.000 sucesos de este tipo. Y varios millones más se habrán de registrar cuando se reemprenda la búsqueda de bosones vectoriales intermedios, en estos meses, en las instalaciones del CERN. El campo magnético aplicado curva los caminos de las partículas cargadas.

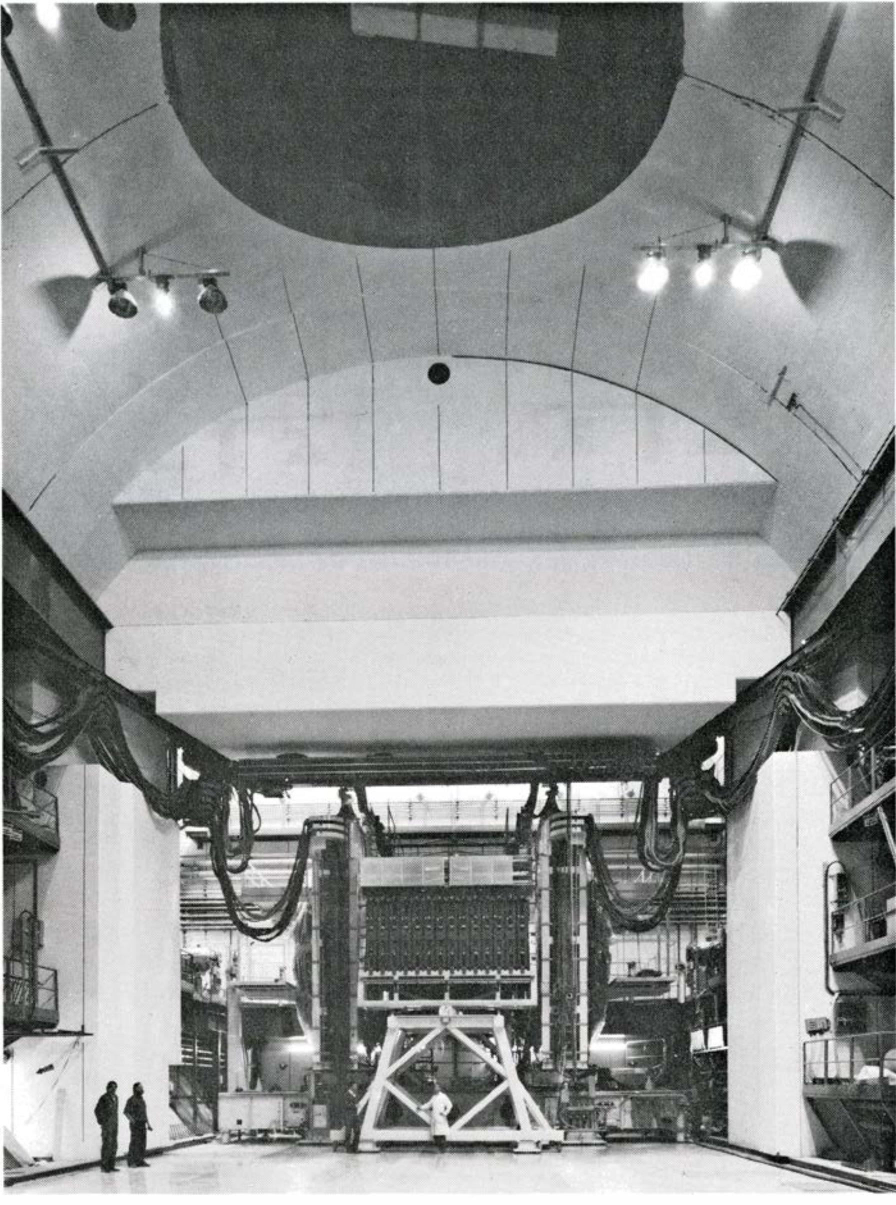
alta y menor tamaño, por ende, del haz). Podemos estimar, pues, que, con tales luminosidades, el ritmo de producción de W^+, W^- y Z^0, aisladas o a pares, será lo bastante alto como para llegarlas a detectar con una frecuencia de hasta mil veces al día [*véase la ilustración superior de la página 23*]. Poco antes de parar la máquina del CERN en las últimas vacaciones de Navidad, se había logrado fugazmente una luminosidad de 10^{28} partículas por centímetro cuadrado y por segundo, colocándose así en el umbral de donde cabe esperar una primera detección de un bosón vectorial intermedio. (La experiencia obtenida en esta fase inicial con la máquina del CERN ha demostrado que, en principio, pueden lograrse colisiones protón-antiprotón con luminosidad de 10^{31} por centímetro cuadrado y por segundo, o más altas, si se dispone de suficiente número de antiprotones.)

¿Cómo nos manifestarán su presencia los bosones vectoriales intermedios producidos en semejantes choques? Se les concede una vida media brevísima. En unos 10^{-20} segundos habrán de desintegrarse espontáneamente para formar otras múltiples partículas, sobre todo pares quark-antiquark y pares leptón-antileptón. (Los leptones son partículas sometidas a las fuerzas nucleares débiles, mas no a las fuertes.) Hay varios procedimientos para detectar leptones cargados, así electrones y muones. Lo que se pretende casi siempre es detectar los leptones cargados procedentes de la desintegración de los bosones vectoriales intermedios y comparar su tasa de producción y otras propiedades con los valores esperados a partir de otras razones que se deducen del proceso de colisión. La señal, en este caso la distribución angular de los leptones de la desintegración de las partículas W^+, W^- y Z^0, se espera que sobresalga del "ruido" de fondo de los leptones surgidos de otras fuentes, sobre todo a grandes ángulos con respecto al eje del haz [*véase la ilustración inferior de la página 23*].

Una muestra inequívoca de la presencia de bosones vectoriales intermedios sería la aparición de una destacada asimetría en la tasa de detección de leptones en los sentidos hacia delante y hacia atrás (medidos arbitrariamente en relación con la dirección del haz de antiprotones). Los leptones que se originan directamente a partir de las interacciones fuertes o electromagnéticas de las partículas del haz deben guardar absoluta simetría. Mas, de acuerdo con la teoría electrodébil, en la desintegración de los bosones vectoriales intermedios los leptones cargados positivamente han de emitirse, predominantemente, hacia delante y los cargados negativamente, hacia atrás de un modo dominante. La esperada asimetría leptónica, que es privativa de un suceso mediado por las fuerzas débiles, débese al spin de las partículas involucradas en la producción y desintegración de los bosones vectoriales intermedios [*véanse las ilustraciones de la página 21*]. La observación de este efecto se tomará por una prueba muy valiosa de que, por fin, se han descubierto los tan buscados bosones vectoriales intermedios. Y luego podrían medirse sus demás propiedades.

La postrera comprobación de que la teoría electrodébil es correcta residiría en la observación del bosón de Higgs en los restos dejados en las colisiones protón-antiprotón. El descubrimiento de esta partícula no sólo demostraría la unificación de las fuerzas electromagnéticas y débiles, sino que dicha unificación sería del tipo pronosticado por la teoría electrodébil al uso. Se sale del marco de este artículo acometer un examen pormenorizado de las técnicas experimentales necesarias para detectar el bosón de Higgs. Lo que no obsta para que digamos que las colisiones protón-antiprotón podrían originar bosones de Higgs, cuyo ritmo de producción esperado es lo bastante alto como para descubrirlos a través del estudio de sus productos de desintegración característicos en las máquinas de colisión de haces del CERN y el Fermilab.

Se han diseñado varios detectores de gran tamaño para identificar productos de desintegración de los bosones vectoriales intermedios y de los bosones de Higgs. Uno de ellos, el bautizado UA1, terminado ya, acaba de entrar en funcionamiento en el CERN. El detector ha coronado el esfuerzo conjunto realizado por un equipo de más de 100 físicos de 11 instituciones de Euro-



OTRO GRAN DETECTOR, el UA2, acaba de construirse en el CERN. Se proyectó con una misión específica: la de buscar bosones vectoriales intermedios. Carece de campo magnético. Se halla instalado en una segunda área experimental, edificada a más de sesenta metros de profundidad, a cierta distancia del UA1. Se contempla aquí en su sitio de operación, a lo largo de la línea del haz del SPS. Cuando no está en uso, se le lleva, rodando, hasta una gran estancia de trabajo que cae en la parte delantera de la fotografía. La gran chimenea cilíndrica que se aprecia en el techo sirve para bajar los componentes.

pa y los Estados Unidos: Universidad de Aachen, Laboratorio de Física de Partículas de Annecy, Universidd de Birmingham, Queen Mary College de Londres, Collège de France, Universidad de California en Riverside, Universidad de Roma, Laboratorio Rutherford, Centro de Investigación Nuclear de Saclay y Universidad de Viena. Mide 10 metros de longitud por cinco de anchura; pesa 200 toneladas. La sala subterránea donde se halla instalado posee capacidad suficiente para guardar el detector en un "garaje" cuando se le quita de su lugar, en el camino de los haces en colisión.

El UA1 es un aparato de múltiples aplicaciones, diseñado para detectar muchas clases distintas de partículas y recoger información sobre un amplio ángulo sólido que rodea el punto donde chocan los haces. Se sirve de varios recursos para medir la energía de las partículas, incluido el de la curvatura de sus caminos en un campo magnético. Un gran imán dipolar aplica el campo magnético principal, horizontalmente, a través de un volumen de 85 metros cúbicos.

En el interior del imán, rodeando el tubo del haz, hay tres "cámaras de deriva"; cada una de ellas contiene un conjunto ordenado de alambres, distantes breves intervalos, y un gas a baja presión. Una partícula cargada eléctricamente que cruce la cámara ionizará las moléculas del gas; los iones se desplazarán luego hacia los alambres, y allí depositarán su carga. De la distribución de cargas que aparezcan en muchos alambres reconstruiremos la trayectoria de la partícula. La cámara de deriva central tiene sus alambres dispuestos en planos verticales; los dos laterales presentan sus alambres dispuestos en planos horizontales. Las señales que dejan las partículas al cruzar los planos de los alambres las analizará un ordenador, que dará una imagen de los productos de desintegración en la pantalla de un tubo de rayos catódicos [*véanse las ilustraciones de las dos páginas precedentes*].

Otros detectores rodean las tres cámaras de deriva. Inmediato y exterior al detector más interno hay un calorímetro de plomo, aparato que mide la cantidad de energía que le ha depositado una partícula cargada, un electrón por ejemplo. El calorímetro se halla encerrado, a su vez, en una serie de placas de hierro, intercaladas en las cuales hay contadores de centelleo para medir la energía de partículas más pesadas, así piones, a través de sus interacciones con los átomos de hierro de las placas. Vemos, por último, en la parte exterior del aparato varias cámaras grandes que tienen por misión detectar los muones que atraviesan las placas de plomo y de hierro.

El segundo detector importante es el UA2. Se ha proyectado para desempeñar un cometido más específico: la búsqueda de bosones vectoriales intermedios. Carece de campo magnético. Se apoya en un dispositivo formado por varios calorímetros similares a los del UA1 para medir la energía y dirección de las partículas salientes [*véase la ilustración de esta misma página*]. El Fermilab tiene en proyecto la incorporación de detectores análogos al UA1 y UA2.

En el caso de que existan realmente los bosones vectoriales intermedios, nos parecen idóneos esos detectores para su descubrimiento e investigación de las propiedades que posean, dando confirmación, por tanto, a la teoría electrodébil unificada. Y si también existen los bosones de Higgs, podrán detectarse a su vez, robusteciendo la prueba confirmadora de la teoría. Ni que decir tiene que la teoría pudiera ser incorrecta y no haber ninguna partícula de esas. Sea como fuere, la respuesta la tendremos muy pronto.

Anillos de la corriente del Golfo

La corriente del Golfo y otras generan remolinos que atrapan agua de propiedades físicas y biológicas diferentes de las del mar que los rodea. Los océanos vienen a ser, pues, mosaicos movedizos

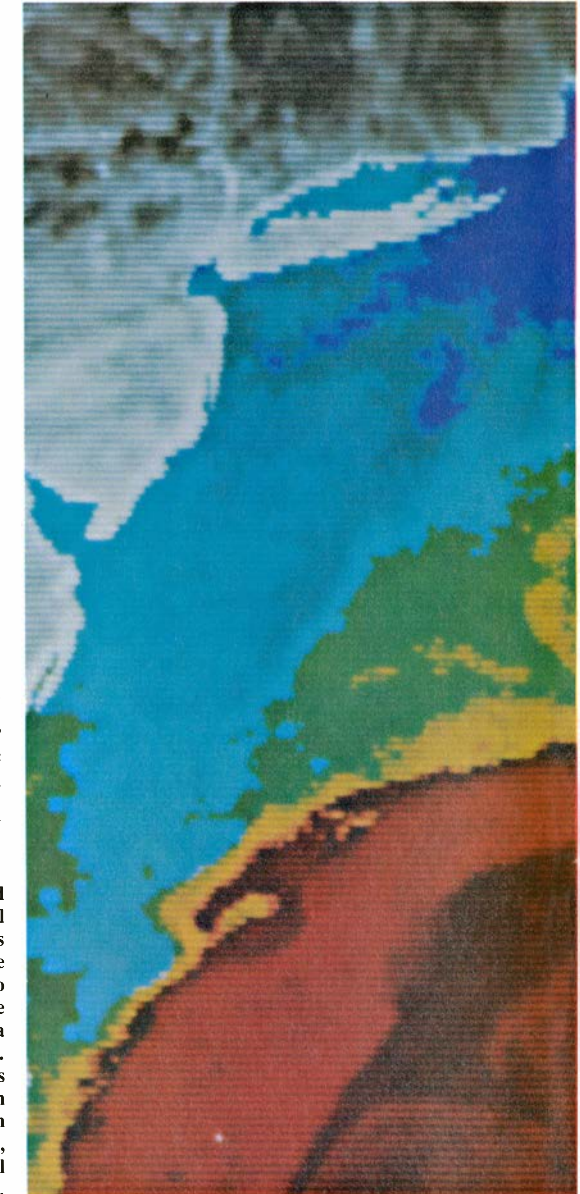
Peter H. Wiebe

Está perdiendo terreno la idea, muy arraigada, de que vastas extensiones oceánicas mantienen una uniformidad en sus propiedades físicas, químicas y biológicas; así, por lo que respecta al océano Atlántico, se había considerado durante mucho tiempo que el mar de los Sargazos era esencialmente una charca de agua estancada, con un perfil uniforme de distribución de la temperatura en función de la profundidad en el mar y una pobreza biológica uniforme. Hoy, nuevos métodos de investigación, en la que intervienen barcos, instrumentos desplegados desde aviones y mediciones por control remoto efectuadas desde aeroplanos y satélites, ponen de manifiesto la existencia de modelos de variación en toda una gama de escalas de espacio y tiempo insospechables hace 20 años. Se revela que los procesos a gran escala de corrientes oceánicas y clima del mundo, que crean y mantienen la distribución de plantas y animales marinos a escalas de millares de kilómetros, también perturban esos sistemas ecológicos, introduciendo torbellinos en los océanos a escalas de centenares de kilómetros.

Los más espectaculares de estos remolinos son unos anillos cerrados de hasta 300 kilómetros de diámetro que se desprenden de corrientes como la del Golfo, que en el Atlántico fluye hacia el norte del mar de los Sargazos. Los anillos, al formarse, se apropian de una columna de agua de uno u otro lado de la corriente y la llevan al lado opuesto, dominio cuya temperatura, salinidad, contenido en oxígeno y distribución de organismos vivos son completamente diferentes. En un momento dado puede haber varios anillos en una cuenca oceánica. Nada impide, pues, que llamemos mosaicos al mar de los Sargazos y a otras regiones de naturaleza semejante.

Los remolinos oceánicos empezaron a interesarme recién graduado, al integrarme en el equipo de la Woods Hole Oceanographic Institution, en 1969. Supe, en su propia voz, de la intención de Peter Saunders, de Woods Hole, de seguir la pista de un gran remolino producido por la corriente del Golfo. Comprendí inmediatamente que la persistencia de un remolino de éstos (que puede durar meses, e incluso un año o dos) debía tener consecuencias biológicas. También constaté que todavía nadie había tratado de estudiar la relación de los remolinos con diversas formas de vida. Pasaron otros tres años antes de que mis colaboradores y yo consiguiéramos desplazarnos hasta un remolino y empezáramos a estudiar su biología.

Se debe a Frederick C. Fuglister, de Woods Hole, la aplicación del término anillo a los remolinos cerrados que se desprenden solos de la corriente del Golfo; inició el estudio de sus propiedades físicas a finales de la década de 1950. El término significa que un anillo de agua desgajado de la corriente del Golfo circula alrededor de un núcleo de agua cuyas propiedades son distintas tanto de las que tiene la corriente anular como de las del agua que rodea a ambos, anillo y núcleo. Algunos



CUATRO ANILLOS ocupan la imagen de la derecha, que muestra en falso color el modelo de intensidad de la radiación infrarroja emitida desde la superficie del Atlántico noroccidental los días 12 a 15 del pasado mes de septiembre. Los colores reflejan la temperatura del agua marina superficial. Dos anillos están al sur de la corriente del Golfo, la corriente roja que atraviesa la imagen serpenteando del sudoeste al nordeste. Son las dos manchas ovaladas de tono bronce que quedan al oeste del pequeño conjunto blanco de nubes. En su caso, un anillo de agua desprendido de la corriente del Golfo rodea un núcleo de agua fría robado al agua del talud, que aparece en azul. Al mismo tiempo hay dos anillos al norte de la corriente del Golfo. Uno tiene un núcleo verde, rodeado en parte de amarillo; queda al sur del cabo Cod. El otro, que se ve más completo, se halla cerca del borde oriental de la imagen. Se formó dos meses antes de la toma de la imagen, pero su rotación en el sentido de las manecillas del reloj ha dispuesto ya un gallardete de agua de la corriente del Golfo, rojo y amarillo, que le circunda en tres cuartas partes. En estos anillos, un aro de corriente del Golfo rodea un núcleo de agua cálida robado al mar de los Sargazos, que queda al sur de la corriente. Los datos de la imagen los registró un sensor de infrarrojos a bordo del satélite NOAA-7 y los procesaron, en ordenador, R. H. Evans, Otis Brown y J. W. Brown, de Miami.

oceanógrafos habían detectado ya esos anillos en travesías efectuadas al sur de la corriente del Golfo en los años 30 y 40, pero no fue hasta la realización de la Operación Cabot, exploración de la corriente del Golfo emprendida entre seis buques en 1950 por Woods Hole en colaboración con otras instituciones, cuando realmente se registró un anillo en el acto de formarse.

El proceso de formación se inicia cuando la corriente del Golfo empieza a serpentear, al discurrir hacia el nordeste, alejándose del continente norteamericano, a partir del cabo Hatteras (Carolina del Norte). Si el meandro se estrangula y deviene circuito cerrado se separará de la corriente, como ocurre con los lagos de brazo muerto en los meandros fluviales abandonados. El resultado será un anillo de agua de la corriente del Golfo que gira veloz alrededor de un núcleo de agua marina de un origen diferente. Un anillo que se forme al norte de la corriente del Golfo tendrá un núcleo de agua apropiada desde el sur, es decir, del mar de los Sargazos. Esta agua es cálida; el mar de los Sargazos es célebre por la extensión que alcanza una capa cuya agua está a 18± 1 grados Celsius de temperatura. La capa ocupa una posición característica, extendida entre 200 y 600 metros de profundidad, aproximadamente. Contrariamente, un anillo que se forme al sur de la corriente del Golfo tendrá un núcleo de agua apropiada desde el norte, concretamente el régimen del talud continental, agua característica que se extiende desde el cabo Hatteras hasta los Grandes Bancos de Terranova y que se encuentra entre la corriente del Golfo y la plataforma continental de Norteamérica. Es un agua fría; su distribución característica determina que, a cualquier profundidad dada, su temperatura sea unos 10 grados Celsius menor que la del agua del mar de los Sargazos.

Los anillos recién formados son grandes. Los de núcleo frío suelen tener un diámetro de entre 150 y 300 kilómetros. Su extensión superficial viene a ser la que ocupan juntos Massachusetts, New Hampshire, Rhode Island y Vermont. Pero, además, se extienden hasta el fondo oceánico, situado a 4000 o 5000 metros de profundidad. Los anillos de núcleo cálido generalmente son algo menores: tienen de 100 a 200 kilómetros de diámetro y su extensión vertical suele detectarse solamente hasta 1500 metros; de todos modos se han estudiado mucho menos que los de núcleo frío, y mediciones futuras pueden hacer variar la idea que de ellos tenemos.

En todo anillo, sea de núcleo cálido o de núcleo frío, hay una reliquia de corriente del Golfo cuya anchura anular

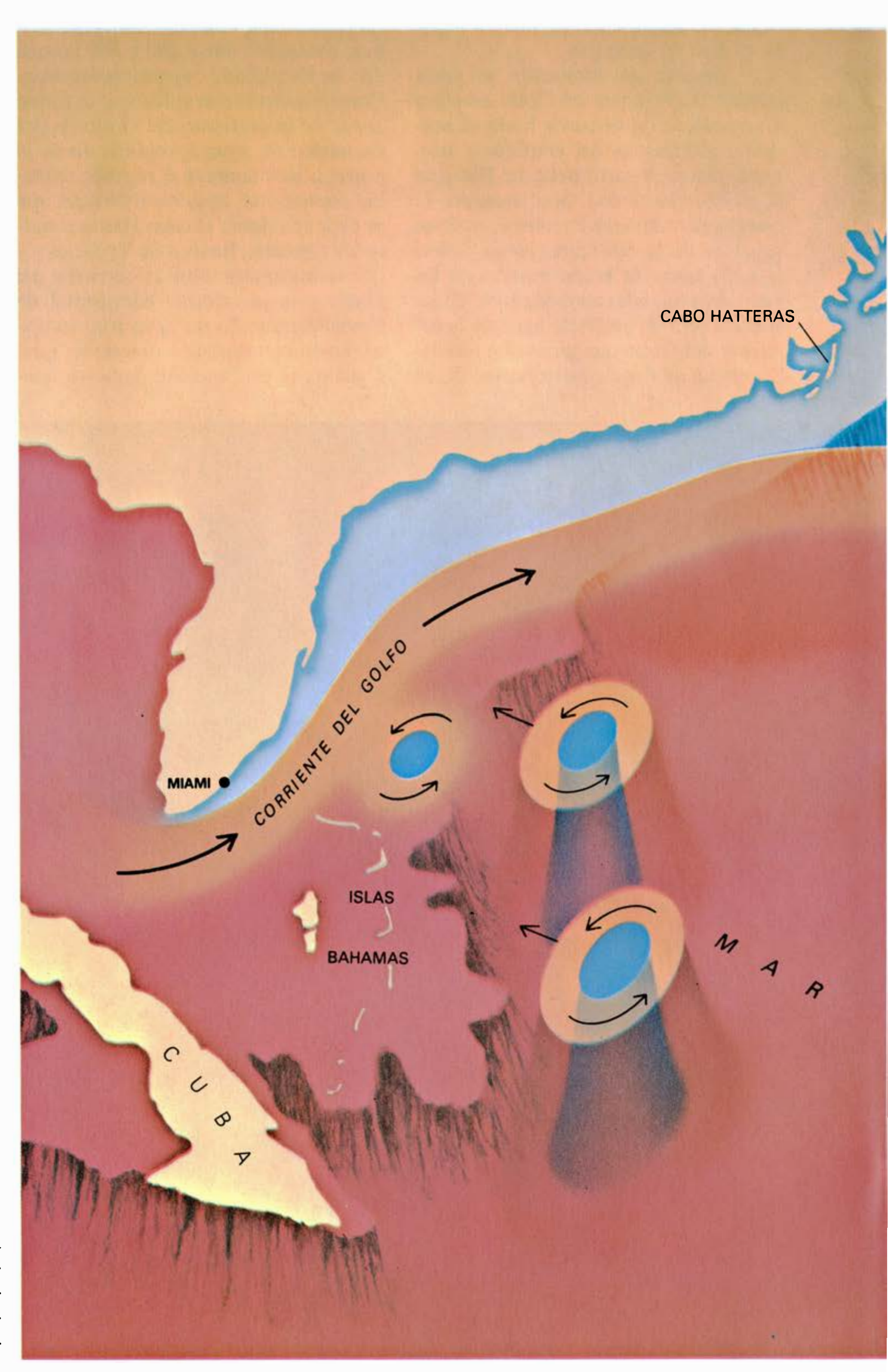


puede alcanzar hasta 100 kilómetros, la propia anchura de la corriente del Golfo. La velocidad de rotación residual del agua en el anillo puede llegar hasta 3 nudos, 1,5 metros por segundo, a una distancia de 30 a 40 kilómetros desde el centro del anillo. Boyas equipadas con un radiotransmisor y rastreadas desde satélites giran alrededor de un anillo recién formado durante un período de dos a cinco días. La velocidad de rotación disminuye hacia el centro del anillo y decrece con la distancia en el agua que rodea el anillo. También se reduce con la profundidad. Con todo, se han medido velocidades de más de 0,5 metros por segundo a 400-500 metros de profundidad por debajo de las fuertes corrientes superficiales.

Las anómalas condiciones que conlleva la presencia de un anillo de núcleo frío en el mar de los Sargazos se hacen claramente patentes en cortes que muestran la estructura vertical de la temperatura en el agua marina, en particular la isoterma de 15 grados, curva que indica a qué profundidad está el agua cuya temperatura es de 15 grados Celsius. Lo típico del mar de los Sargazos es que la isoterma de 15 grados se encuentre a 600 o 700 metros de profundidad. Junto al borde sur de la corriente del Golfo, sube gradualmente; después, en la propia corriente, su ascenso es espectacular. De hecho, el gradiente de temperatura a través de la corriente del Golfo es uno de los más fuertes de los registrados en alta mar en todo el mundo; es tan abrupto que al borde septentrional de la corriente lo llaman Cold Wall (literalmente, pared fría). A lo largo de esta pared fría la isoterma de 15 grados se halla a 100 metros de profundidad. En el agua del talud, al norte de la corriente, todavía se acerca más a la superficie.

La estructura de la temperatura en un anillo de núcleo frío acabado de formar revela gradientes análogamente abruptos. Consideremos el anillo de núcleo frío al que bautizamos Bob, que se formó en febrero de 1977 y cuya pista se siguió y fue objeto de estudio durante todo aquel año, desde que nació hasta que murió. En el centro del anillo Bob, las isotermas de 10 a 16 grados estaban a un nivel de hasta 600 metros por encima de sus profundidades normales en el mar de los Sargazos. La densidad del agua, cuya distribución es casi un calco de la temperatura, reveló elevaciones parecidas.

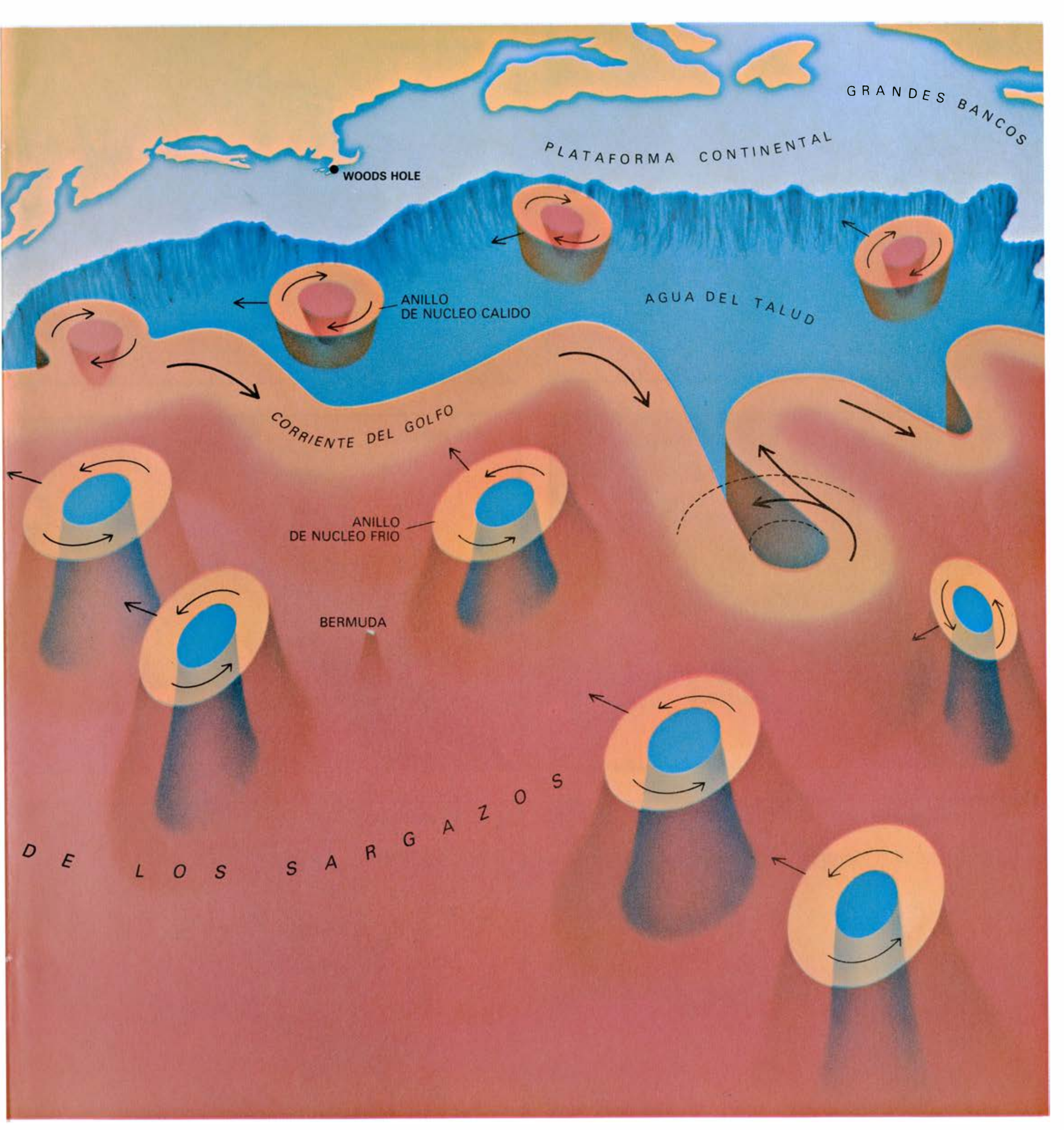
La gran elevación de la densa agua marina implicaba que el anillo Bob encerraba una vasta reserva de energía potencial, y también que ejercía presión en el agua circundante. La presión se veía aumentada por la fuerza centrífuga ejercida por la rotación del anillo. Además, se modulaba, porque la superficie del mar en un anillo se desvía de la nivelación gravitatoria. (Mediciones efectuadas desde satélites indican que la superficie en el centro de un anillo está deprimida 0,5 metros, aproximadamente.) La presión hacia fuera ejercida por un anillo se compensa en gran parte por el efecto de Coriolis, una fuerza que actúa en un anillo a me-



DISTRIBUCION TIPICA DE LOS ANILLOS en el Atlántico noroccidental. El esquema, basado en análisis de temperatura del océano y otros datos, es de Philip L. Richardson, de la Woods Hole Oceanographic Institution. En general, los anillos de núcleo frío, que ocupan el mar de los Sargazos, miden hasta 300 kilómetros de diámetro. Según indican los modelos teóricos, pueden extenderse hacia el fondo oceáni-

dida que éste emigra por el océano. El efecto de Coriolis se debe a la rotación de la Tierra. En términos generales, se considera que la migración de un anillo y su desvanecimiento final se deben principalmente a una falta de equilibrio entre presión, fuerza centrífuga y fuerza de Coriolis. Otras fuerzas, así el rozamiento, apenas si representan un 1 por ciento de estas fuerzas primarias.

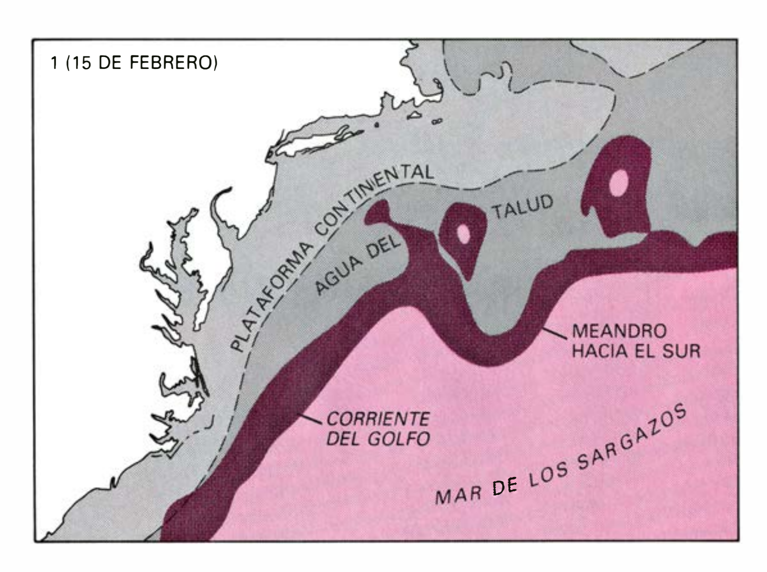
La distribución de la salinidad en el mar esclarece un poco más cuál es la estructura de los anillos. En particular, la salinidad en los niveles superiores de un anillo de núcleo frío puede ser una parte por mil más baja que la que en el mar de los Sargazos tiene un agua de la misma temperatura (pero de profundidad mayor). Esta anomalía, bastante sorprendente tratándose de alta mar, puede persistir durante 18 meses o más;

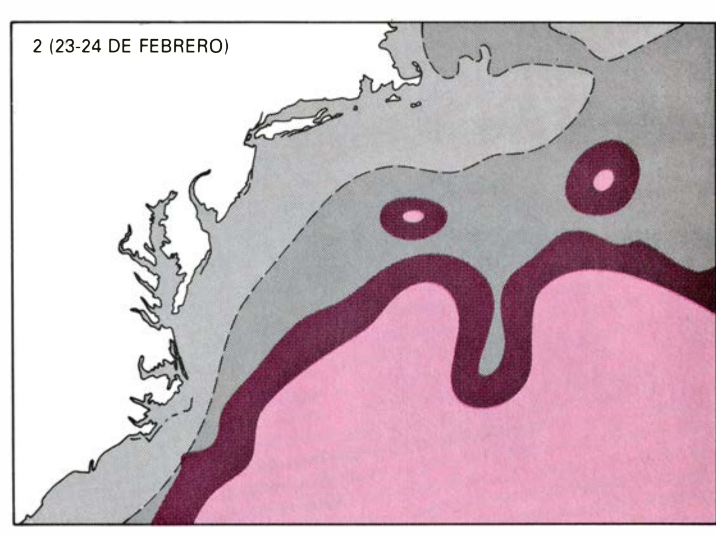


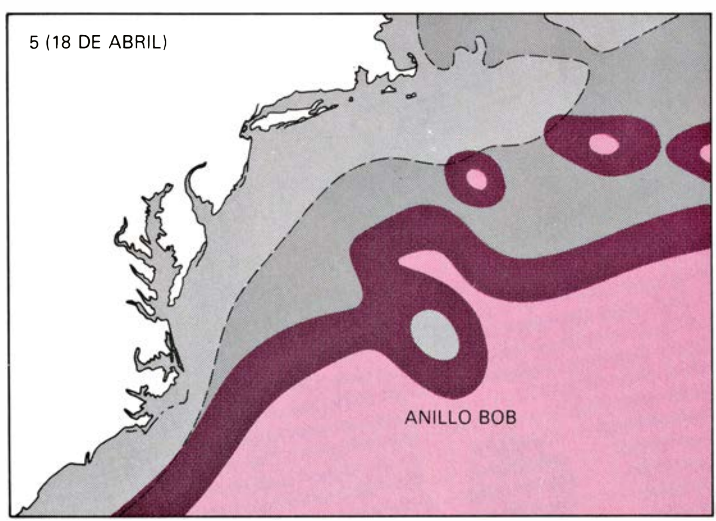
co hasta profundidades de 4000 a 5000 metros. Los anillos de núcleo cálido, que se encuentran rodeados de agua del talud, son menores y más someros. Los anillos se despegan en la parte oriental de la región representada y se desplazan erráticamente hacia el sudoeste; al cabo de unos meses se han debilitado. En cualquier momento dado los anillos de núcleo frío pueden ocupar hasta el 40 por ciento del territorio del agua del talud, y los anillos de núcleo frío pueden ocupar hasta el 15 por ciento del mar de los Sargazos. En el dibujo, la escala vertical del océano se ha exagerado por un factor de 100.

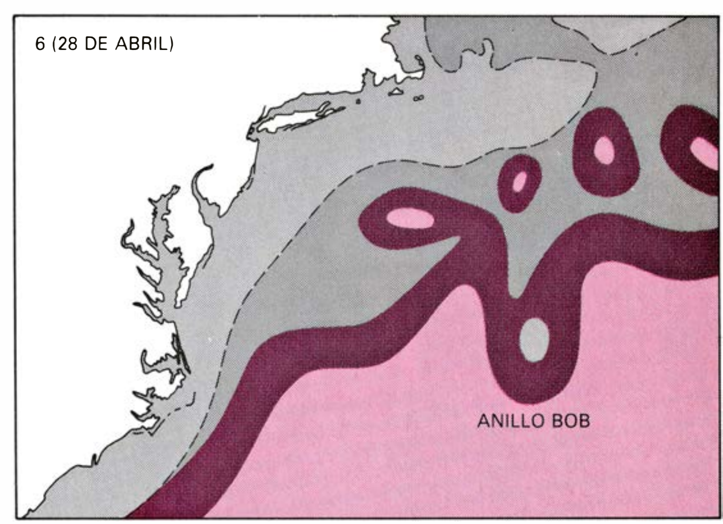
por consiguiente, constituye una prueba de que una parte sustancial de un anillo se mantiene intacta durante un buen período de tiempo. Demuestra, además, que el anillo es algo muy diferente de una onda oceánica en la que brota agua fría temporalmente.

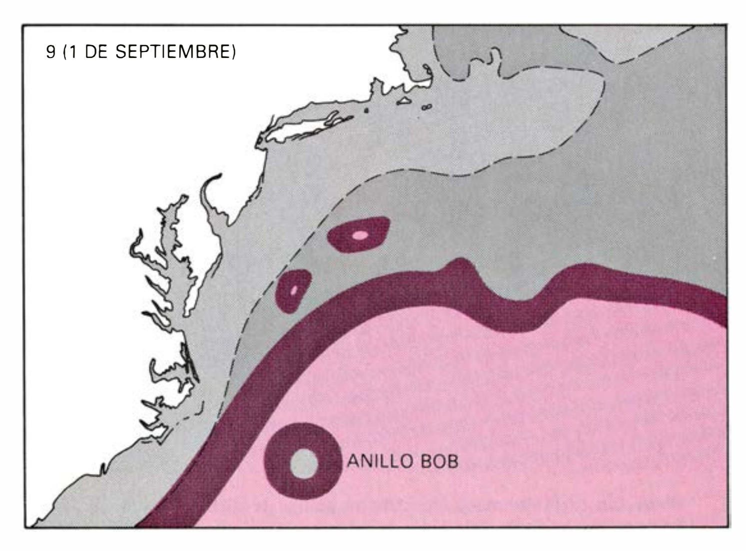
También es resolutiva la distribución en el océano del oxígeno disuelto. El agua de la corriente del Golfo procedente del Caribe tiene una concentración de oxígeno baja para un agua cuya temperatura está comprendida entre ocho y 18 grados Celsius; el agua del talud y los núcleos de los anillos de núcleo frío recién formados poseen una concentración alta y el agua del mar de los Sargazos y los núcleos de los anillos de núcleo cálido jóvenes, una concentración intermedia. De estas diferencias se desprende que, mediante medi-

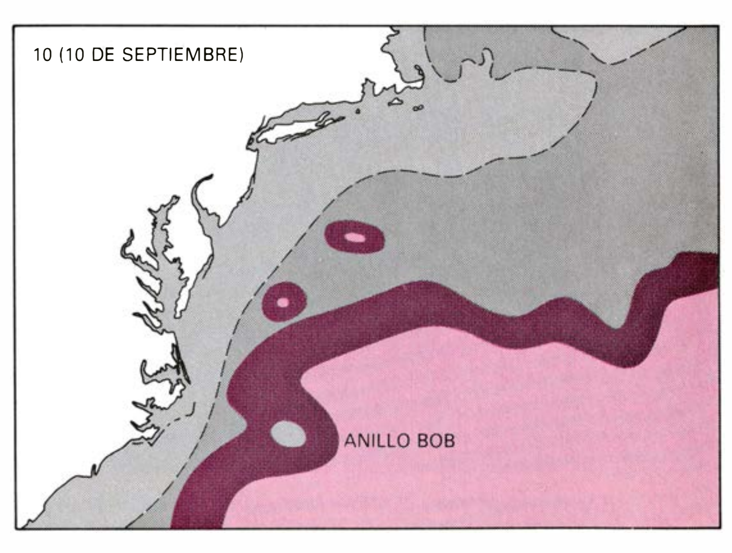








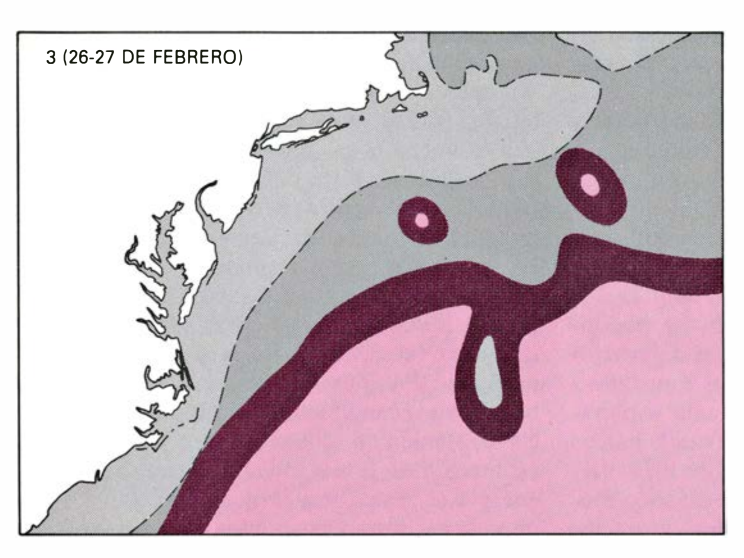


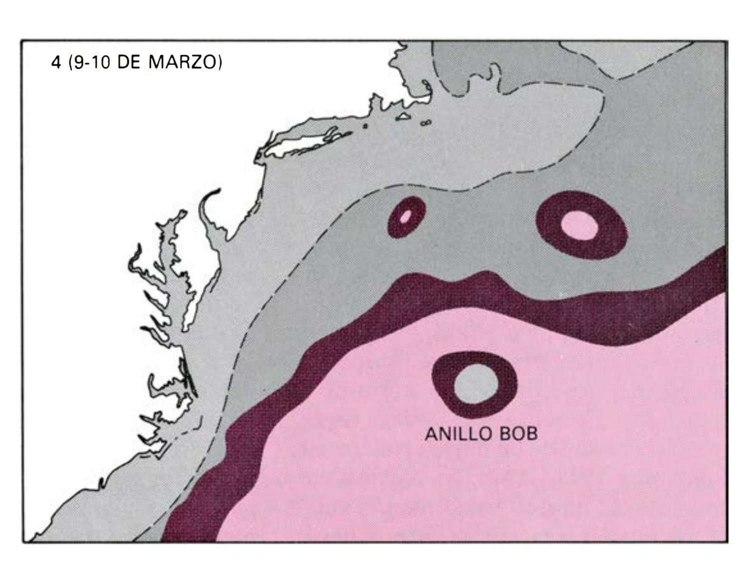


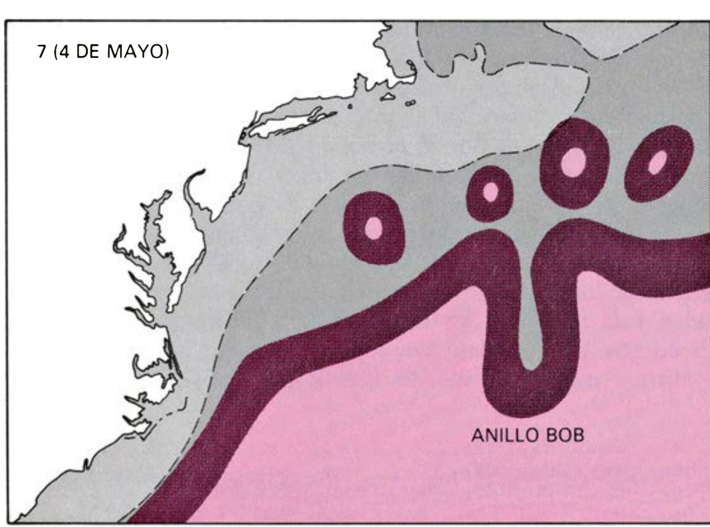
HISTORIA DE UN ANILLO, ejemplificada en la del anillo de núcleo frío al que llamamos Bob, que se formó a mediados de febrero de 1977. Primero la corriente del Golfo serpenteó hacia el sur (*1*). El meandro se convirtió en un circuito casi cerrado (*2*); la presilla se estranguló (*3*) y se desprendió de la corriente (*4*). Así se convirtió en un anillo. Cinco semanas después se volvió a unir a la corriente, trasladándose desde el flanco oeste al flanco oriental de

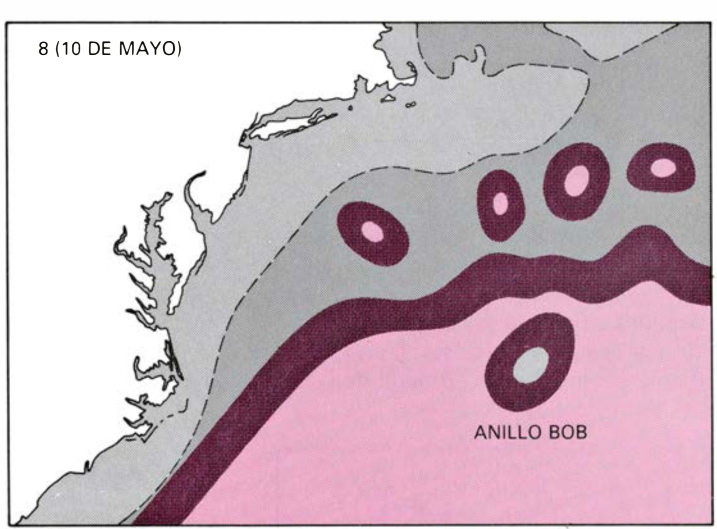
ciones de gran precisión de la concentración de oxígeno a lo largo de los flancos de los anillos, es posible clasificar el agua marina en función de su origen. Las mediciones, efectuadas por Dana R. Kester, de la Universidad de Rhode Island, demuestran claramente que el agua de los flancos de un anillo de núcleo frío y el agua del mar de los Sargazos que lo rodea están interfoliadas. Todavía no se ha determinado la tasa de intercambio en estas interfoliaciones; de hecho ni siquiera está todavía claro si las interfoliaciones representan intercambios de agua o si, contrariamente, pueden ser artefactos que persisten desde el tiempo en que se formó el anillo.

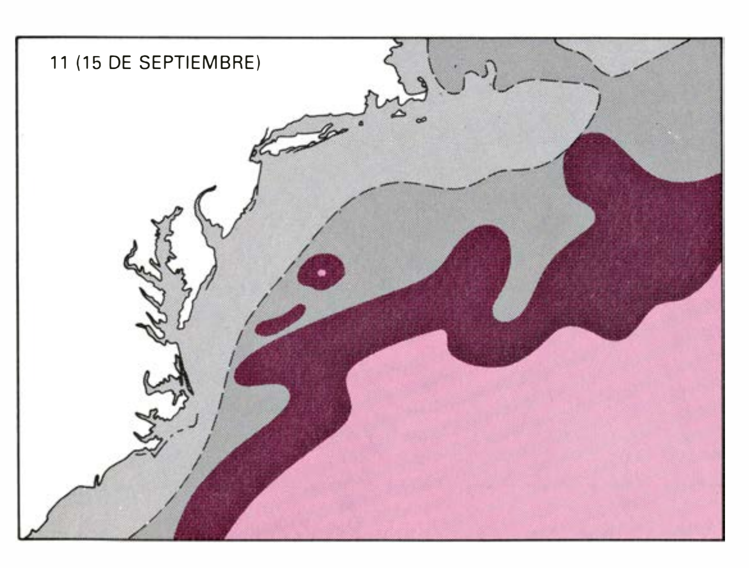
¿Cuántos anillos se forman en un año? ¿Cuánto tiempo duran? ¿Dónde van y cómo evolucionan?

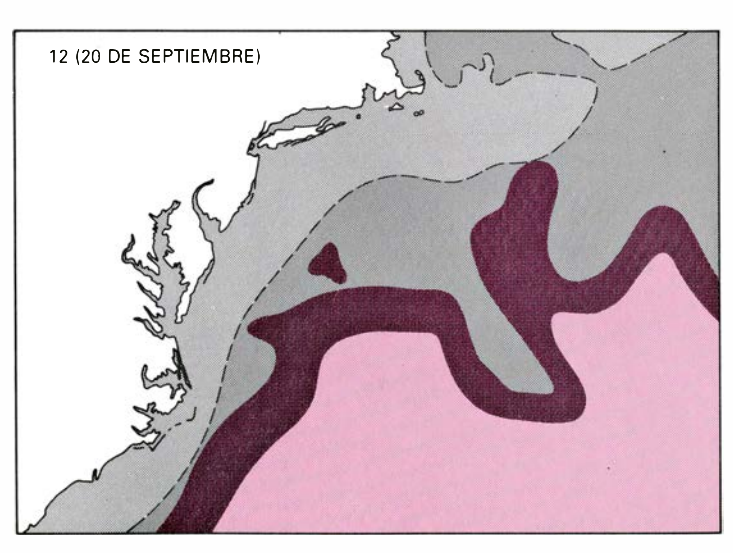












un meandro que se convirtió en un anillo de núcleo cálido (*5, 6*). En mayo volvió a quedar despegado (*7, 8*). Durante varias semanas se mantuvo más o menos estacionario. Pero en septiembre se fue acercando a la corriente del Golfo frente a la costa de Carolina del Norte (*9*). Se fundió con la corriente y desapareció (*10, 11, 12*). La historia la dedujo Richardson de las imágenes infrarrojas. Al norte de la corriente los anillos son de núcleo cálido.

Fuglister calculó que el número de anillos que se desprenden a cada lado de la corriente del Golfo en un año varía entre cinco y ocho. Su método, indirecto, se basaba en el cálculo de dos cantidades: por una parte, la diferencia de volumen entre la afluencia de agua de la corriente del Golfo en el cabo Hatteras y la emisión de agua de la corriente del Golfo en los Grandes Bancos en el transcurso de un año; por otra parte, la diferencia de extensión superficial del agua del talud debida a desviaciones de la corriente del Golfo respecto a su posición media.

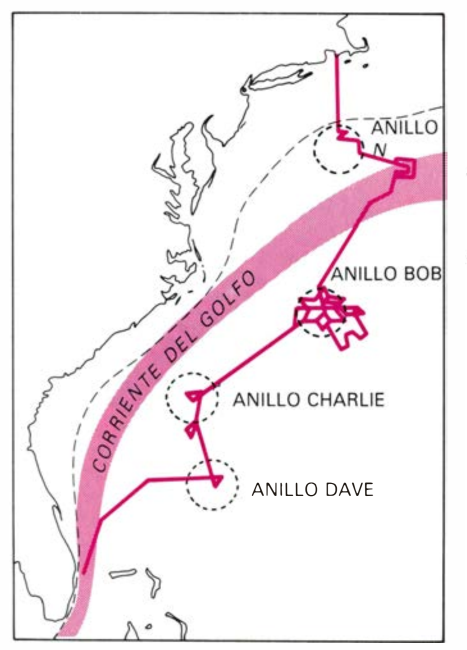
Un censo de anillos de núcleo cálido llevado a cabo por J. L. Chamberlin y sus colegas, en el National Marine Fisheries Service de Narragansett (Rhode Island), corrobora las previsiones de Fuglister respecto al lado norte de la corriente. En el censo se indican de siete a nueve anillos de núcleo cálido cada año entre 1975 y 1978. En algunos momentos del año no había ningún anillo y en otros había seis o siete. Cuando había muchos, ocupaban hasta el 40 por ciento de la extensión superficial correspondiente al agua del talud. No se ha intentado la confección de ningún censo parecido para el sur de la corriente, en parte debido a los elevados costos que suponen las exploraciones a gran escala efectuadas desde buques y aviones, dificultad a la que hay que sumar la de que durante la mayor parte del tiempo las nubes impiden el rastreo de anillos desde satélites. (Las observaciones desde satélites se efectúan mediante las longitudes de onda de la gama de infrarrojos, fuertemente emitidos por los cuerpos calientes. Las imágenes que se obtienen indican el modelo de distribución de la temperatura en la superficie del mar, incluido el modelo peculiar de los anillos.)

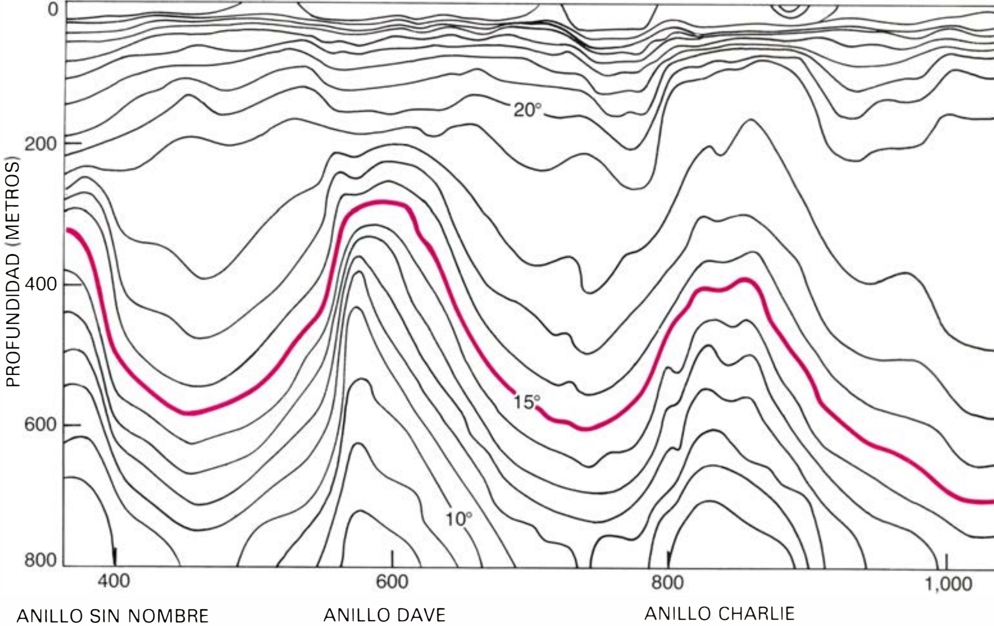
Cuando en los próximos años, sin salirnos de esta década, se disponga de sensores de microondas instalados en satélites será posible contar directamente los anillos de núcleo frío. Estos sensores detectarán las radiaciones oceánicas, y con ellas su temperatura, a longitudes de onda dotadas de mayor capacidad para atravesar las nubes. Además, medirán la altura del mar, otro indicador adicional de la presencia de anillos. Hasta ahora, Philip L. Richardson, de Woods Hole, ha analizado registros de distribución de la temperatura en el mar de los Sargazos y también los registros de una exploración de ese mar efectuada desde barcos y satélites en la primavera de 1975. Llega a la conclusión de que en todo momento hay unos 10 anillos de núcleo frío.

Los más jóvenes y patentes se encuentran en una región preferente de desprendimiento de anillos situada exactamente al sur de la corriente del Golfo, entre 75 y 60 grados de longitud oeste. Anillos más antiguos se detectan al sur y al oeste de esta región. En el mar de los Sargazos nunca se detectó anillo alguno al sur de 30 grados de latitud norte ni al este de 65 grados de longitud oeste. De todos modos, esta región todavía no está bien explorada. En conjunto parece poderse afirmar que los anillos de núcleo frío ocupan entre un 10 y un 15 por ciento de la extensión superficial del mar de los Sargazos.

Evidentemente, el número de anillos presentes en cualquier momento dado debe estar determinado en parte por el tiempo que persiste cada uno. Este aspecto de la historia de la vida de los anillos hoy por hoy tampoco puede ser tratado más que en términos cualitativos. Richardson y sus colaboradores han colocado boyas en varios anillos y han seguido la pista de las boyas por satélite durante períodos de hasta ocho meses. La verdad es que, en ninguna de las observaciones mencionadas, se siguió la vida completa del anillo. Se sabe que algunos anillos identificados en imágenes sucesivas de infrarrojos han persistido dos años. Es más, un cálculo basado en la cantidad de energía potencial contenida en un anillo joven y una estimación de la velocidad a la cual la energía se disipa sugieren un período de vida de dos a cuatro años. La reincorporación a la corriente del Golfo acorta, a menudo, la vida de un anillo; por eso, Richardson presupone que el lapso medio de vida de un anillo de núcleo frío se cifra entre un año y año y medio. El máximo probable es tres.

Los anillos se mueven de maneras complejas. Además de girar, migran a través del océano; en realidad, el movimiento de traslación del agua que constituye un anillo lo predice para profundidades de hasta 1500 a 2000 metros un modelo ideado por Glenn R. Flierl, del Instituto de Tecnología de Massachu-





ESTRUCTURA DE LA TEMPERATURA en el Atlántico noroccidental, registrada en un crucero en zigzag desde Miami, Florida, hasta Woods Hole, Massachusetts, por el buque de investigación *Endeavor*, que atravesó el núcleo de cinco anillos, incluido el llamado Bob, en agosto de 1977. En el anillo

setts. Una vez que se sueltan de la corriente del Golfo, ambos tipos de anillos, los de núcleo cálido y los de núcleo frío, tienden a desplazarse hacia el oeste o el sudoeste a una velocidad media del orden de cinco centímetros por segundo (cuatro kilómetros al día). La velocidad de traslación varía: lo típico es que haya unos períodos en que los anillos se mueven a más de 10 centímetros por segundo y otros períodos en que el anillo está estacionario.

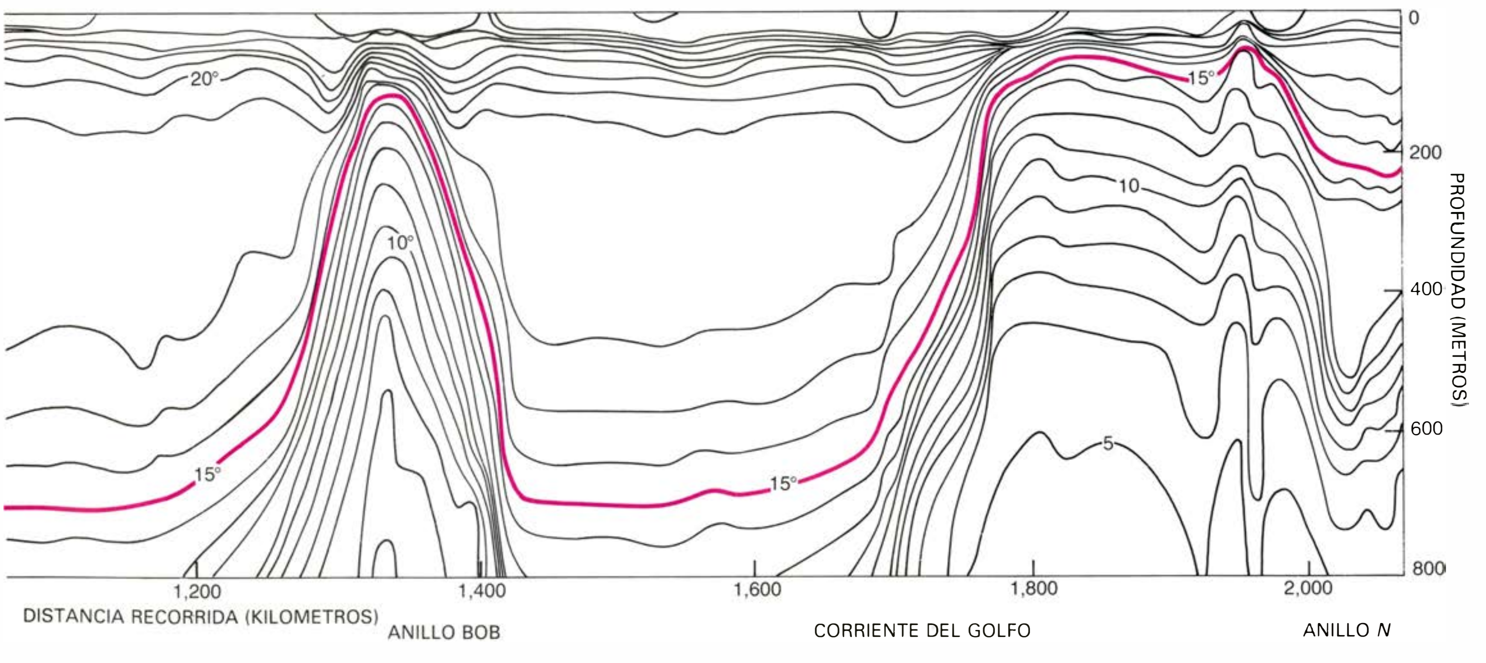
Algunos anillos se mantienen alejados de la corriente del Golfo conforme se trasladan hacia el sudoeste por entre un "callejón de torbellinos". Finalizan en una región situada al norte de las Bahamas y al este de Florida. Es un cementerio de anillos, un lugar donde los anillos se funden con la corriente del Golfo y desaparecen. Parece, sin embargo, que la mayoría interactúa reiteradamente con la corriente del Golfo. Tales anillos quedan unidos a la corriente, que los vuelve a desplazar hacia el nordeste a velocidades de hasta 25 centímetros por segundo. Entonces, si la fusión no es completa, se vuelven a desprender, a veces muy modificados. En algunos casos son menores, pero están dotados de más energía que antes de la interacción. Cada ciclo de estos tarda entre uno y tres meses. Mediante interacciones reiteradas con la corriente del Golfo, la trayectoria de un anillo de núcleo frío a través del mar de los Sargazos puede dibujar una serie de grandes circuitos cerrados que giran en el sentido de las manecillas del reloj.

Durante los períodos en que el anillo está aislado de la corriente del Golfo se va degradando paulatinamente. En un anillo de núcleo frío, el proceso puede detectarse en el calentamiento del agua del núcleo, el aumento de salinidad de esta agua y el hundimiento de la zona de contenido mínimo de oxígeno en el agua. (En la parte norte del mar de los Sargazos la zona de mínimo de oxígeno queda entre 700 y 1000 metros. En el agua del talud, constitutiva del núcleo de un anillo de núcleo frío acabado de formar, se halla entre 100 y 200 metros.) El mejor indicador individual de la degeneración física de un anillo de núcleo frío es la tasa de hundimiento de las isotermas. Mediciones reiteradas de la estructura vertical de la temperatura en diversos anillos del núcleo frío sugieren que la tasa de hundimiento es de 0,3 a 0,4 metros por día. En general, los valores menores se miden en los anillos más antiguos. Las isotermas combadas hacia abajo representan una cúpula de agua fría que se hunde. Además, señalan la disminución de la energía cinética del anillo y del volumen de agua que éste transporta por el mar.

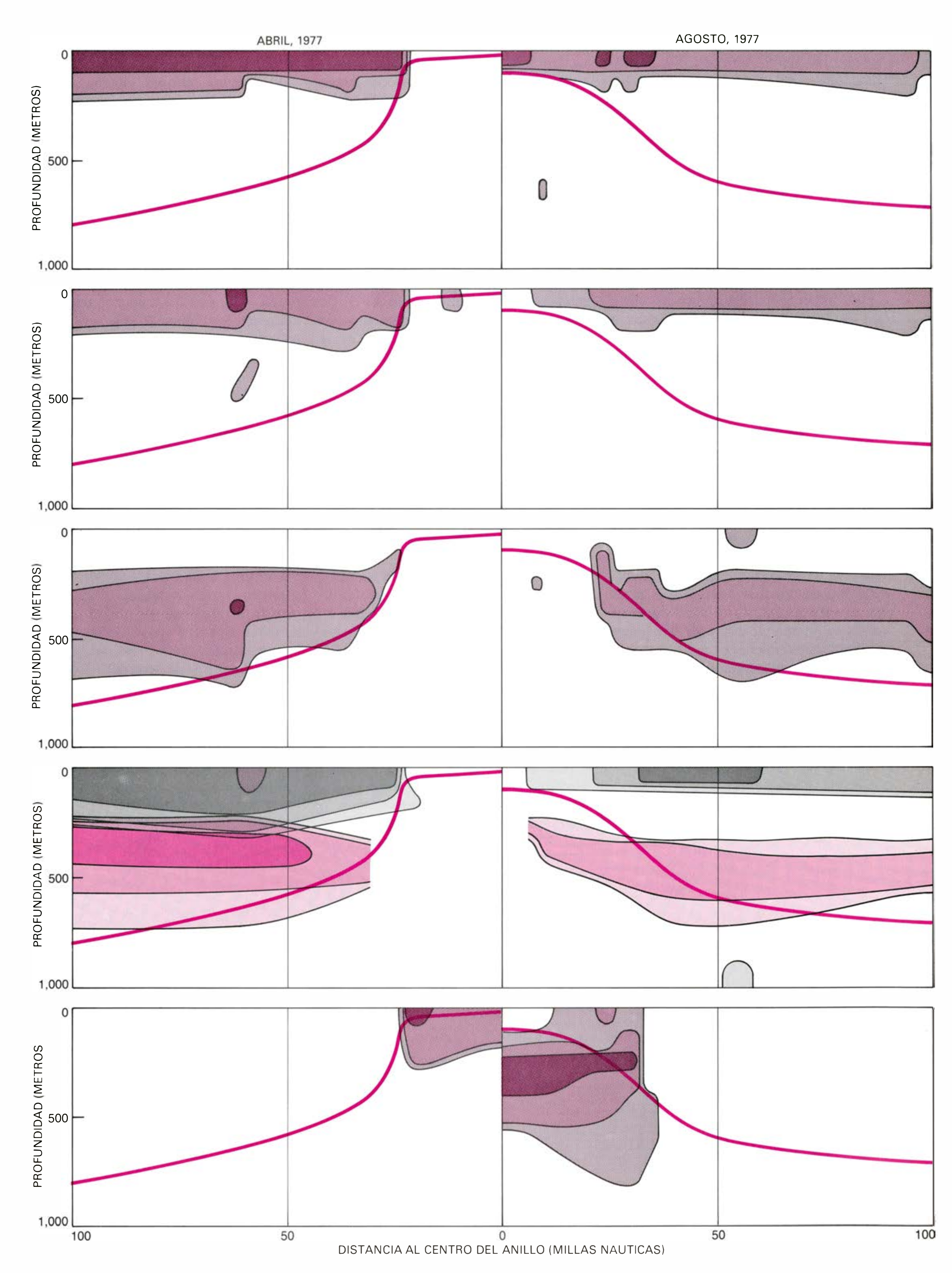
La degeneración física de un anillo va acompañada de una profunda transformación de su biología, por la sencilla razón de que la ecología de los organismos propios del agua fría del talud es muy diferente de la que caracteriza a los organismos del agua cálida del mar de los Sargazos. Un anillo joven conserva esta diferencia, pero, conforme va desvaneciéndose, el ambiente que favorece la existencia de las formas de vida en su interior empieza a desaparecer.

En esencia, el agua del mar de los Sargazos (y el núcleo de un anillo de núcleo cálido recién formado) alberga gran número de especies tropicales y subtropicales, si bien sus poblaciones son relativamente pequeñas y tienden a mostrar un tamaño parecido. Contrariamente, el agua del talud (y el núcleo de un anillo de núcleo frío acabado de formar) se parece mucho a los mares subárticos del norte suyo: sustenta a un número relativamente pequeño de especies, de las cuales unas pocas son dominantes, y su biomasa, o sea, el contenido total de materia viva, es mucho mayor que la de aguas más cálidas.

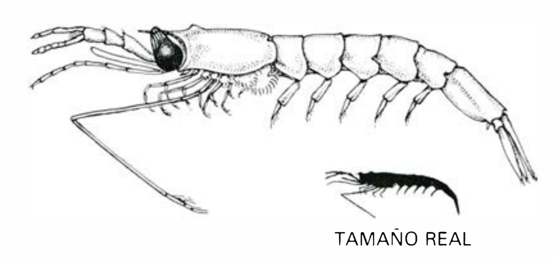
Aquí voy a centrarme en las formas planctónicas de la vida marina. El término comprende los vegetales (fitoplancton) y los animales (zooplancton) que flotan a la deriva en el mar. La mayor parte del fitoplancton lo constituyen vegetales unicelulares de tamaño comprendido entre cinco y 75 micras. Son los productores primarios del mar: forman moléculas orgánicas a partir de moléculas inorgánicas mediante la fotosíntesis, ya que contienen clorofila, la sustancia fotosintetizadora. Los organismos del zooplancton suelen ser algo mayores que los del fitoplancton, si bien generalmente no rebasan los cuatro centímetros de longitud. Los hay unicelulares, como los protozoos, y hay organismos más complejos, como algunos crustáceos y las larvas de muchas especies de peces. Se alimentan de fitoplancton y unos de otros, según una



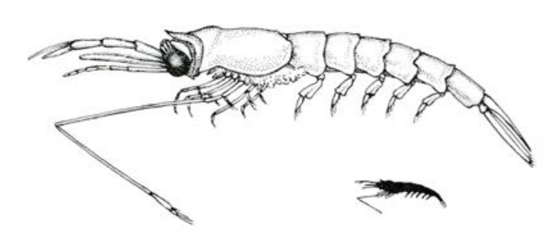
Bob, de núcleo frío, la isoterma que señala la profundidad del agua marina cuya temperatura es de 15 grados (*color*) estaba casi 600 metros más arriba que en el agua del mar de los Sargazos que le rodeaba. En el anillo *N*, de núcleo cálido, la isoterma estaba a 150 metros por debajo de su nivel local.


ABRIL, 1977
AGOSTO, 1977
PROFUNDIDAD (METROS)
0
500
1,000
PROFUNDIDAD (METROS
100
50
0
50
100
DISTANCIA AL CENTRO DEL ANILLO (MILLAS NAUTICAS)

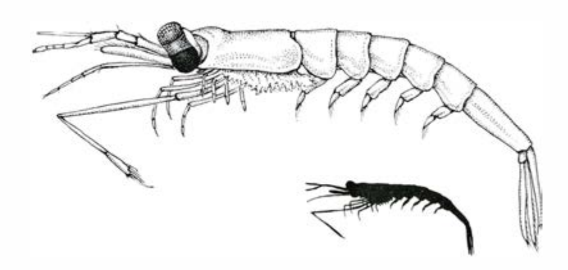
a STYLOCHEIRON CARINATUM



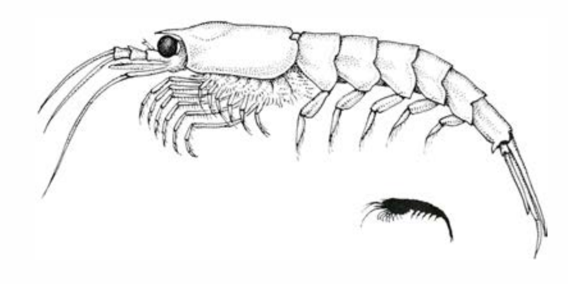
b STYLOCHEIRON SUHMII



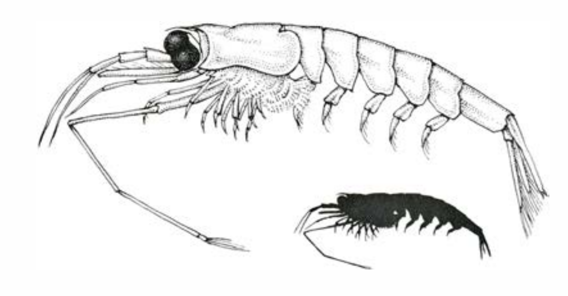
c STYLOCHEIRON ELONGATUM



d EUPHAUSIA BREVIS



e NEMATOSCELIS MEGALOPS



malla de relaciones sumamente compleja.

Considerando todo lo anterior, volvamos al anillo Bob. Cuando mis colaboradores y yo lo estudiamos por vez primera en abril de 1977, la distribución de clorofila sugirió sorprendentemente diferencias en la concentración de fitoplancton entre el centro del anillo y el agua circundante. En el núcleo frío del anillo, que era agua del talud, la concentración de clorofila (y, presumiblemente, de fitoplancton) resultó muy alta: medimos 3,0 microgramos de clorofila por litro de agua marina. La distribución indicaba un confinamiento de los valores altos en los 30 metros superiores del mar. Con la distancia al centro, la concentración disminuía y los valores máximos aparecían muy por debajo de la superficie, a 60 o 70 metros. El modelo resultó el típico de las diferencias entre el mar de los Sargazos y el agua del talud.

El zooplancton reveló una distribución algo más compleja. Habíamos esperado hallar concentraciones altas en el centro del anillo y una disminución gradual en sus flancos, de modo que la concentración en la periferia encajara con la concentración típica del mar de los Sargazos. La concentración ciertamente era alta en el centro. Pero en el agua residual de corriente del Golfo que rodeaba el núcleo se halló una zona en la que el zooplancton aún escaseaba más que en el océano que la rodeaba. Al parecer, en el momento en que se formó el anillo Bob (dos meses antes de que llegáramos a él) la corriente del Golfo tenía una concentración de zooplancton menor que la del mar de los Sargazos, y esta pobreza de vida persistía.



BIOLOGIA DE UN ANILLO. Se transforma a medida que éste envejece, al cambiar condiciones tales como temperatura, salinidad y contenido en oxígeno. Aquí se indica la abundancia de cinco especies de minúsculos crustáceos parecidos a langostinos en el núcleo del anillo Bob y en el agua del mar de los Sargazos circundante, en abril de 1977 (cuando el anillo no tenía más que dos meses) y en agosto del mismo año. En los cuatro meses intermedios *Stylocheiron carinatum* (*a*), una especie de agua cálida que vive cerca de la superficie, entró en el anillo. Llegó hasta el centro. Entre tanto, *S. suhmii* (*b*), otra especie de agua cálida y de superficie, aunque penetró, se adentró menos. *S. elongatum* (*c*), una especie de agua cálida que vive muy por debajo de la superficie, apenas penetró. *Euphausia brevis* (*d*), una especie migratoria de agua cálida que asciende de noche y baja de día, mostró la misma incursión en las pescas de día que en las nocturnas. El color denota su abundancia diurna; el negro, la nocturna. Por lo que respecta a las demás especies, está combinada la abundancia nocturna con la diurna. *Nematoscelis megalops* (*e*) es una especie de agua fría. Se encontró únicamente dentro del anillo. Entre abril y agosto bajó a mayor profundidad en el anillo, al parecer tratando de mantenerse en las condiciones que favorecen su supervivencia. La curva de color de cada gráfico es la isoterma de 15 grados en el agua del mar.

El esquema de abundancia global de fitoplancton y zooplancton en abril de 1977 reflejaba modelos de abundancia de especies particulares. Por ejemplo, especies de agua cálida tales como *Limacina inflata*, caracol marino que vive en aguas tropicales y subtropicales de todos los océanos de la tierra, sólo se encontraron en abundancia fuera del anillo Bob recién formado. Por el contrario, especies de zooplancton que viven en la fría agua del talud estaban confinadas en el núcleo del anillo. Entre ellas se contaban *L. retroversa*, también caracol marino, *Nematoscelis megalops*, pequeño crustáceo parecido al langostino, y *Pareuchaeta norvegica*, crustáceo pequeño célebre por carecer de ojos compuestos (o sea, formadores de imagen). La distinta distribución vertical en el núcleo del anillo Bob observada en estas especies de agua fría, en abril de 1977, reflejaba las profundidades a las que normalmente viven en el agua del talud.

Al volver al anillo Bob en agosto de ese año observamos lo mismo que habíamos encontrado en otros anillos de núcleo frío en vías de degeneración: había disminuido el número de especies presentes en la comunidad planctónica de agua fría del anillo. Si el anillo seguía aislado de la corriente del Golfo, sin duda todas ellas llegarían a desaparecer por completo. Nuestros estudios demuestran que el tiempo requerido para la extinción varía con la especie; oscila entre unos pocos meses y un lapso de hasta 1,5 años. Nuestros estudios demuestran, además, que la disminución del plancton de núcleo frío da lugar a una curiosa distribución de la vida en la columna de agua. A menudo, los 200 metros superiores de un anillo de núcleo frío que degenera tienen una biomasa significativamente menor que los 200 metros superiores del mar de los Sargazos circundante. Los 800 metros subyacentes son significativamente más ricos que los adyacentes del mar de los Sargazos, con una riqueza suficiente como para que la columna de agua del anillo retenga una abundancia de zooplancton mayor que el mar de los Sargazos que la envuelve, por lo menos hasta al cabo de un año de su formación.

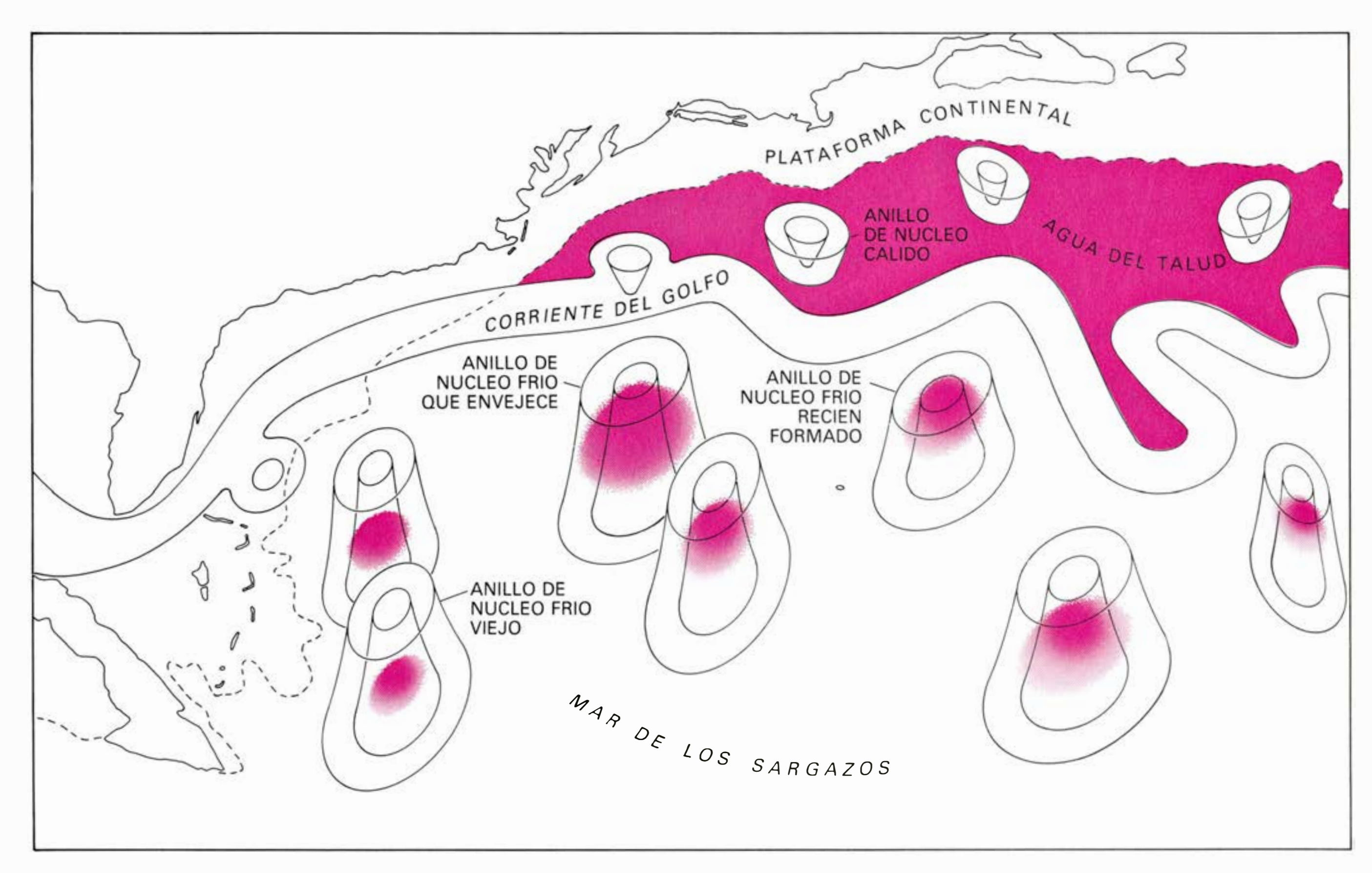
Los responsables de esta curiosa distribución son, al parecer, dos procesos

que actúan simultáneamente. En primer lugar, la agitación por los vientos y el calentamiento por el sol afectan la parte superior del mar. Por consiguiente, la degeneración de las condiciones que favorecen la vida de agua fría en un anillo de núcleo frío es más rápida cerca de la superficie. Durante un lapso de entre uno y tres meses después de formado el anillo de núcleo frío, la parte superior de su núcleo puede todavía parecerse mucho al agua de talud. Pero luego empieza una acusada transformación. Decrece la abundancia de fitoplancton de agua fría y disminuye el tamaño de los organismos. En el anillo Bob, el cambio resultó espectacular: entre abril y agosto de 1977, la concentración de clorofila en el núcleo disminuyó hasta en ocho veces. No es raro que herbívoros de superficie, como *L. retroversa*, acusen más inmediatamente la degradación de su ambiente de agua fría en un anillo de núcleo frío que envejece que omnívoros habitantes de zonas más profundas, como *N. megalops*, o carnívoros de profundidad, como *P. norvegica*.

Otra causa de que en un anillo de núcleo frío que degenera la concentración de organismos planctónicos sea muy inferior a la de superficie radica en que, al parecer, varias especies de agua de talud emigran hacia niveles más bajos de la columna de agua, tratando de permanecer en su ambiente favorito. La especie parecida a un langostino como *N. megalops* demuestra muy bien esta actitud. Es endémica del agua del talud; en nuestros muestreos del Atlántico noroccidental nunca la hemos hallado al sur de la corriente del Golfo, a no ser en anillos de núcleo frío. En el agua del talud, el grueso de la población de *N. megalops* queda por encima de los 300 metros de profundidad, tanto de día como de noche.

En anillos de núcleo frío jóvenes, la distribución de la población es la misma. En cambio, cuando el anillo tiene ya seis meses, bastantes organismos viven a más de 300 metros de profundidad y se encuentran algunos aislados hasta 800 metros. En anillos todavía más viejos la mayoría de la población vive por debajo de los 300 metros. El descenso a niveles más profundos de *N. megalops* en un anillo de núcleo frío que se degrada coincide con el hundimiento tanto de las isotermas como de las isohalinas, curvas de salinidad del agua. En efecto, el 50 por ciento central de la población adulta de *N. megalops* parece buscar agua con una temperatura de 10 ± 2 grados Celsius en el agua del talud o en un anillo.

El traslado hacia abajo de *N. megalops* implica que los animales quedan desconectados de la concentración de comida más próxima a la superficie; por consiguiente, el descenso coincide con un deterioro de las condiciones fisiológicas y bioquímicas de las especies. La degradación fisiológica la indica una reducción de la tasa de respiración de los animales, y la bioquímica un aumento del contenido en agua y una reducción de su contenido en lípidos, carbono y nitrógeno. Además, en anillos más viejos hemos observado una disminución del ritmo de crecimiento de individuos de *N. megalops*, en comparación con el que presentan en el agua del talud, a la par que una reducción en la proporción machos-hembras. En suma, parece que los individuos de *N. megalops* en un anillo de núcleo frío que degenera van desfalleciendo a medida que los niveles de comida resultan insuficientes para su desarrollo y reproducción. El más viejo de los anillos de núcleo frío que muestreamos tenía una



DISTRIBUCION HIPOTETICA DE *N. MEGALOPS*. Las tonalidades reflejan la propensión de la especie al agua de 10 grados Celsius de temperatura. *N. megalops* abunda al norte de la corriente del Golfo. Al sur de la corriente su vida se mantiene sólo en anillos jóvenes. En anillos que envejecen busca unas profundidades mayores. En los anillos viejos se extingue. La distribución de *N. megalops* hace dudar de las primeras hipótesis, según las cuales las condiciones se mantienen uniformemente adecuadas o inadecuadas para la supervivencia de una especie dada en vastas extensiones del océano.

edad de 17 meses y en él no encontramos ningún individuo de *N. megalops*, a pesar de que antes el anillo los había tenido.

¿Acaso mueren también de inanición otras especies? Así parece, e incluso para cada especie planctónica cabe otra posibilidad, la de que por el movimiento y la degeneración de un anillo algunos de sus individuos vayan a parar al mar de los Sargazos contiguo. El modelo diseñado por Flierl, en el MIT, induce persuasivamente a creer que, mientras un anillo se mueve por el mar de los Sargazos, en realidad sólo se desplaza parte de la columna de agua que conforma el anillo. Según dicho modelo, la parte atrapada del anillo tiene las dimensiones máximas en la superficie y es progresivamente menor conforme aumenta la profundidad, hasta anularse a los 1000 o 1500 metros. Por consiguiente, los inviduos de especies tales como *N. megalops*, que pasan a ocupar niveles más bajos de la columna de agua de un anillo que envejece, pueden terminar quedando muy por debajo de la parte atrapada del anillo, y éste puede dejarlos rezagados. Nuestros propios análisis sobre la distribución de especies de agua fría, como *N. megalops* y *P. norvegica*, en los flancos de anillos de núcleo frío inducen a pensar que realmente algunos individuos quedan fuera por procesos físicos.

A medida que las condiciones de un anillo de núcleo frío que envejece resultan progresivamente menos apropiadas para la superviviencia de las diversas especies de agua fría, esas mismas condiciones empiezan a resultar atractivas para algunas de las especies de agua cálida del contiguo mar de los Sargazos. Cerca de la superficie, el fitoplancton de agua fría deja paso a algunas de las formas menores y menos abundantes típicas del mar de los Sargazos, al tiempo que el zooplancton de agua fría cede ante el de agua cálida. De hecho, algunas de las especies del zooplancton de agua cálida del mar de los Sargazos explotan hasta tal punto las cambiantes condiciones existentes en anillos de núcleo frío de edad intermedia que llegan a ser más abundantes en ellos que en cualquier otra parte del mar de los Sargazos. El molusco de agua cálida *L. inflata* constituye un ejemplo. En abril de 1977 apenas se hacía ver en el núcleo del anillo Bob, pero su población ya se había multiplicado por 300 cuatro meses después, a la vez que su abundancia en el mar de los Sargazos había disminuido por un factor de 0,7, según parece como consecuencia de un ciclo estacional normal.

Otras especies de aguas cálidas penetran de manera más gradual en un anillo de núcleo frío que envejece. A este respecto, el zooplancton perteneciente al género langostiforme *Stylocheiron* puede ser muy representativo de especies de aguas cálidas que van ocupando los nichos ecológicos dejados vacantes, en un anillo de núcleo frío en proceso de degeneración, por las especies de agua de talud que van desapareciendo. En nuestras muestras del Atlántico noroccidental suelen aparecer cinco especies de *Stylocheiron*. A diferencia de otras especies planctónicas de formas semejantes, apenas si presentan ninguna tendencia a las migraciones verticales diurnas. Por el contrario, reflejan un grado muy notorio de estratificación vertical. En el mar de los Sargazos se ha observado, de acuerdo con ello, que el centro de la distribución vertical de *S. elongatum* se encuentra entre 300 y 400 metros, el de *S. affine* entre 200 y 250 metros, el de *S. abbreviatum* entre 100 y 200 y el de *S. carinatum* y *S. suhmii* entre la superficie y 100 metros.

En anillos de núcleo frío muy jóvenes no se encuentra ninguna de estas especies. Por ejemplo, en abril de 1977, en el anillo Bob no había ninguna de las cinco. Cuatro meses después, una de ellas, *S. carinatum*, había llegado al centro, pero no las otras, ni siquiera *S. suhmii*, que vive a la misma profundidad que *S. carinatum*. Al cabo de otros dos o tres meses probablemente todas habían ya llegado allí. Los anillos de núcleo frío que hemos estudiado cuando su edad era de seis a nueve meses comprenden las cinco especies a profundidades muy parecidas a las que ocupan en el mar de los Sargazos. Evidentemente, medio año supone una modificación en los 300 metros superiores de un anillo de núcleo frío más que suficiente para que muchas especies de agua cálida realicen sus funciones normales en ellos.

Los anillos de núcleo caliente se forman por un proceso que, en esencia, es la imagen especular del que origina los anillos de núcleo frío. ¿Cabe, pues, esperar que las transformaciones biológicas en un anillo de núcleo cálido que se degrada sean las inversas de las transformaciones que he descrito para anillos de núcleo frío, como el Bob? La respuesta está en el aire. No se han estudiado todavía los detalles de la biología de anillos de núcleo cálido. Lo que se sabe es que el estado fisiológico y bioquímico de una especie de zooplancton depende de la calidad y la cantidad de comida disponible, así como de las condiciones masivas que afectan a la tasa de metabolismo del organismo. Las especies de agua cálida expatriadas del mar de los Sargazos en el núcleo de un anillo de núcleo cálido quizás encuentran una abundancia progresivamente mayor de comida conforme va degenerando el anillo donde se hallan, pero deben soportar la inferior tasa de metabolismo resultante de una temperatura decreciente del agua.

He tratado de demostrar en este artículo que los anillos son, por sí mismos, dignos de estudio. Es más, brindan una oportunidad para investigar los mecanismos que regulan múltiples características ecológicas del océano. Después de todo, la formación, degeneración y desaparición final de un anillo permite vislumbrar qué ocurre cuando una gran población expatriada de organismos marinos se ve sometida a cambios hidrográficos y biológicos que superan los de su experiencia normal. Los mismos cambios tienen lugar continuamente a lo largo de los bordes del hábitat normal de una especie. Pero en ellos resulta difícil identificar cuáles son los cambios particulares importantes. En los anillos, los diversos cambios (de temperatura, de salinidad y demás) parecen no ir emparejados: ocurren con ritmos diferentes, de modo que a un observador le cabe la esperanza de descubrir cuáles están fuertemente relacionados con una alteración de la abundancia de una especie. Es una oportunidad sin precedentes en biología de poblaciones. Un experimento terrestre equivalente requeriría seguir el control, durante un período de dos años, del desplazamiento hacia el sur de los Estados Unidos, de una extensión continental del tamaño de Massachusetts, New Hampshire, Rhode Island y Vermont juntos, con su suelo, bosques, praderas, ríos, lagos y animales.

No me he ocupado aquí más que del Atlántico noroccidental. Pero también hay anillos en los océanos atravesados por corrientes tales como las de Kuroshío, Agulhas, Brasil, Australia oriental y Somalia. Otras formas de remolinos se encuentran cerca de la corriente de California y en los mares ecuatoriales. Es muy probable que allí donde fluyen corrientes oceánicas fuertes se genere alguna forma de remolinos. Y es igualmente probable que los remolinos afecten no sólo a la hidrografía del mar, sino también a la biología. Ya se están efectuando nuevos estudios multidisciplinarios de remolinos oceánicos y hay otros en puertas. Esperemos que tales estudios proporcionen nuevas ideas acerca de las fuerzas que rigen los océanos.

Ciencia y sociedad

Cromatografía de líquidos

Durante años el campo del análisis de mezclas complejas por técnicas cromatográficas ha estado dominado por los métodos basados en la cromatografía de gases (CG), tanto en columnas de relleno como en columnas capilares de alta resolución, mientras que la cromatografía de líquidos (CL) en columnas de adsorción, partición, intercambio iónico o exclusión molecular no ha podido competir hasta ahora con la CG en cuanto a eficacia y rapidez de análisis. En la práctica, la eficacia de un sistema cromatográfico se expresa por el número de platos teóricos (N); entendiéndose por este parámetro la expresión numérica del número de zonas hipotéticas en las que se establece el equilibrio dinámico durante el proceso de partición entre las fases móvil y estacionaria.

El factor eficacia define la anchura de las bandas cromatográficas, lo que junto a la selectividad, fija la resolución del sistema, dependiendo la velocidad de separación del tiempo de equilibrio expresado por el número de platos teóricos generados por unidad de tiempo. En general, el químico analítico sabía que, si la volatilidad de la muestra lo permitía, debía recurrir a métodos de CG para optimizar una determinada separación, a pesar del mayor potencial teórico de la cromatografía en fase líquida en cuanto a la selectividad o retención relativa entre dos solutos a resolver cromatográficamente. Dicho potencial quedaba limitado, en la práctica, por la eficacia relativamente reducida de las fases estacionarias para CL (tamaño de partícula y porosidad excesivas) y por problemas instrumentales (limitaciones de flujo y volúmenes muertos del sistema).

Sin embargo, desde mediados de la década de los años 70, esta situación ha variado como resultado del desarrollo de nuevos tipos de columnas e instrumentación especial para CLAE, que permiten alcanzar niveles de eficacia y rapidez comparables, o incluso en ocasiones superiores, a los de la CG, aportando, además de la mayor selectividad inherente a la posibilidad de modificación de ambas fases, móvil y estacionaria, un mayor rango de aplicaciones no limitado por la volatilidad o polaridad de la muestra, como sucede en CG.

Pero, ¿dónde reside el motivo de este espectacular auge de las técnicas de cromatografía en fase líquida? La explicación empieza por el desarrollo de los rellenos microparticulados que permitieron acelerar el proceso de reparto del soluto entre ambas fases, con el consiguiente incremento de la eficacia (N), incluso a flujos de fase móvil relativamente elevados (rapidez de análisis). Paralelamente a la introducción de los rellenos microparticulados hay que destacar el desarrollo de sistemas de bombeo de la fase móvil, capaces de vencer la mayor resistencia mecánica de cualquier tipo de columna rellena con micropartículas, impulsando para ello la fase móvil a presiones elevadas y sin fluctuaciones de flujo. De ahí la expresión "cromatografía líquida de alta presión" (CLAP), más restrictiva y menos precisa que la de CLAE, ya que el desarrollo tecnológico que ha experimentado el proceso de fabricación y empaquetamiento de columnas, cada vez más cortas y uniformes, se traduce en una disminución de la presión de trabajo, respecto a las primeras aplicaciones de la CLAE. Por último, el aumento de eficacia y rapidez de análisis ha exigido el desarrollo de microcélulas de detección de flujo continuo y sistemas de amplificación y registro con constantes de tiempo adecuadas para poder detectar y registrar con suficiente presteza la rápida elución de las diferentes especies químicas de una muestra.

El gran impulso de la CLAE parte de la introducción, a principios de la década de los años 70, de los rellenos microparticulados de porosidad controlada. El primer paso en este sentido lo constituyó la introducción comercial de las partículas de tipo pelicular. Estas partículas de núcleo impenetrable (esferas de vidrio) se recubrían de una fina capa de material poroso como fase estacionaria (sílice) de espesor y porosidad controlada. De esta forma se consiguió una mayor eficacia y rapidez de análisis a través de la mejor calidad de empaquetamiento, derivada de la mayor uniformidad de las partículas, y de la considerable reducción del tiempo de equilibrado dinámico de los solutos entre ambas fases. La gran irregularidad de las partículas porosas implicaba una excesiva tortuosidad y profundidad de poro; comportaba un significativo retraso para un determinado porcentaje de la población de las moléculas del soluto interaccionante con el lecho cromatográfico. Esto se traducía en una mayor dispersión de la banda cromatográfica y, por consiguiente, en una menor eficacia, especialmente cuanto mayor era la velocidad de elución. Se consiguió luego eficacias muy superiores gracias a la ulterior reducción del tamaño de las partículas, habiéndose llegado en la actualidad casi al límite de alturas de plato teórico [unas dos veces el tamaño de partícula (d_p)]. Por ejemplo, para un d_p = 10 micras se obtendrían en teoría 45.000 platos/metro, mientras que a un d_p = 4 micras le corresponderían 112.000 platos/metro, de los cuales en la práctica con este tipo de rellenos se obtienen entre el 80 y el 90 por ciento de estos valores.

La gran mayoría de separaciones analíticas se efectúan en columnas preparadas con micropartículas de 5-10 micras de diámetro a las que se les ha ligado químicamente la fase estacionaria, lo cual les confiere una mayor estabilidad y reproducibilidad. De este modo, puede conseguirse una mayor selectividad escogiendo adecuadamente el tipo de funcionalidad más apropiado para las sustancias que se desea separar. Por ejemplo, partículas con fases ligadas de polaridad débil, moderada o alta en las que los grupos acídicos silanol de la superficie de la sílice se han sustituido por grupos funcionales polares del tipo siloxano Si-O-Si-R, en donde R puede ser un grupo diol, nitro, trialquilamina, ciano, cianopropilo, amino, dimetilamino o aminopropilo. Como resultado de esta disponibilidad de distintos tipos de fases ligadas estables y de polaridad controlada, la cromatografía clásica de reparto (partículas recubiertas por un líquido polar y fases móviles poco polares) ha caído en desuso.

Probablemente hoy en día las fases ligadas con grupos ciano (CN) o amino son las más populares; especialmente las primeras, ya que las columnas CN presentan menor retención respecto a la sílice pero su selectividad es similar. Sin embargo, la técnica más utilizada en CLAE es la cromatografía de líquidos en fase reversa sobre rellenos ligados a grupos no polares del tipo alquilsilano o fenil-silano y con eluyentes polares.

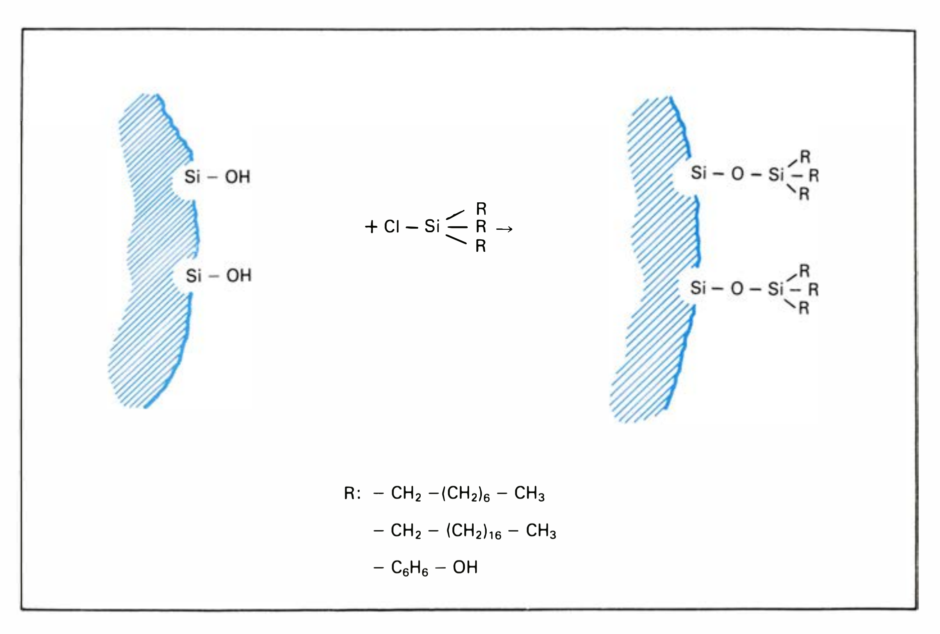
La popularidad de esta técnica, que acapara entre el 70 y el 80 por ciento de las publicaciones aparecidas recientemente, se debe a la posibilidad de separar, en una misma muestra y con una sola columna, compuestos no polares,

no iónicos, compuestos iónicos y sustancias ionizables. En el primer caso, la separación depende de la selección de una mezcla apropiada de disolvente orgánico/agua, mientras que los compuestos iónicos o ionizables pueden separarse por simple modificación y control del equilibrio iónico de la muestra y de la fuerza iónica de la fase móvil. La adición de las sales y tampones necesarios es factible gracias a la utilización de fases móviles acuosas, lo que constituye una gran ventaja en aplicaciones biológicas en donde suelen manipularse extractos y fracciones acuosas, que pueden analizarse directamente.

En cromatografía de líquidos de fase reversa normal se utiliza un relleno de naturaleza hidrofóbica, con agua y un modificador orgánico (metanol o acetonitrilo) como fase móvil. Cuando los solutos son ácidos o bases débiles con valores de pK entre 2 y 8 puede suprimirse su ionización por adición de una pequeña concentración de un ácido o una base más fuerte, con lo cual se controlan las características de retención y se mejora la eficacia. El proceso recibe la denominación de cromatografía líquida de supresión iónica. Por otra parte, cuando se trata de ácidos o bases más fuertes, cuya ionización no es fácilmente suprimible, se recurre a la formación de pares iónicos neutros con contraiones de carga funcional iónica de signo opuesto al del soluto: [A^+ acuoso + B^- acuoso $\rightleftarrows$ (AB) org.]. Los contraiones más utilizados son los alquilsulfatos o sulfonatos y las sales de tetralquilamonio, aunque también se ha descrito el uso de metales y quelatos como contraiones, con el fin de aumentar la selectividad en determinadas aplicaciones.

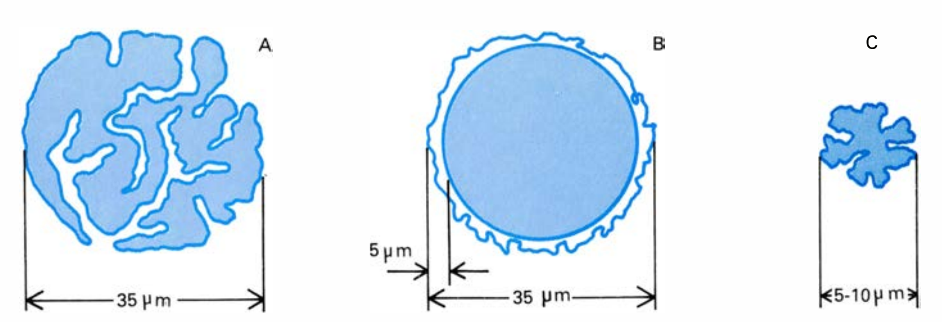
Por su versatilidad, facilidad de uso, alta eficacia y rapidez de re-equilibrado después de la elución por gradiente, en muchos casos la cromatografía de pares iónicos ha desplazado a la cromatografía de intercambio iónico, aunque recientemente por tratamiento químico de micropartículas de sílice se han desarrollado rellenos para intercambio que resisten presiones elevadas y tienen capacidades comparables con las de las resinas del tipo estireno/divinilbenceno, habiéndose mejorado también la estabilidad mecánica de estas últimas.

A raíz de lo cual, se han impuesto las micropartículas porosas del tamaño ≤10 micras, habiendo pasado los rellenos peliculares a segundo término, ya que por su menor eficacia se les aprovecha en precolumnas. Las columnas modernas empaquetadas con partículas de 5 micras, por ejemplo, pueden proporcionar hasta 10.000 platos teóricos en cuestión de pocos minutos, de modo que una columna comercial de 25 centímetros × 4-4,6 milímetros dará un mínimo de 16.000 a 20.000 platos teóricos, pudiendo conseguirse eficacias del orden de los 100.000 platos teóricos por conexión en serie de tres o cuatro columnas, lo que permite resolver de 200 a 400 componentes.



Esquema de reacción de un clorosilano con los grupos silanol de la sílice para la formación de una fase ligada para cromatografía de líquidos en fase

Las columnas empaquetadas con partículas de 10 micras tienen una longitud de 25 a 30 centímetros, mientras que las de 5 micras permiten obtener eficacias comparables o incluso mayores con longitudes de sólo 10 a 15 centímetros, con el consiguiente aumento de rapidez de separación. Por otro lado, la reciente introducción de micropartículas de 3 micras ha reducido aún más la longitud de la columna, comercializándose ya columnas de 5 a 7,5 centímetros de longitud para la denominada cromatografía ultrarrápida. Los flujos utilizados en este caso, gracias a la mayor rapidez de reparto entre ambas fases, son del orden de 2 a 5 mililitros/minuto, consiguiéndose separaciones espectaculares en cuestión de segundos y a niveles de eficacia próximos al límite teórico. Sin embargo, la rapidez de elución y la reducción de los volúmenes de elución de las respectivas bandas cromatográficas (alta eficacia) imponen severas restricciones instrumentales en cuanto al ensanchamiento de dichas bandas fuera de la columna (diámetro y longitud de tubos de conexión y volumen de la célula del detector), así como en relación con la velocidad de respuesta de los sistemas de amplificación y registro de la señal, por lo que este tipo de columnas no pueden conectarse a la mayoría de instrumentos comerciales como las de 10 o 15 micras. Estas consideraciones de tipo instrumental también son válidas para las columnas de pequeño diámetro (0,5 a 1 milímetro) o capilares que, aunque todavía en su infancia en cuanto a desarrollo y posibilidad de aplicación rutinaria en CLAE, en teoría presentan grandes ventajas: para el acoplamiento directo de la CL y la espectrometría de masas.



*Distintos tipos de partículas: de sílice totalmente porosa (**izquierda**), de núcleo impenetrable (**centro**) y micropartícula de sílice porosa (**derecha**)*

Respecto al incremento de eficacia y rapidez en CLAE, otro parámetro que también ha sido explotado con éxito es el de la calidad y uniformidad del empaquetamiento (efectos de pared) a través del sistema de compresión radial, mediante el cual se aplica presión hidráulica sobre la superficie externa de la columna, cuya pared en lugar de acero inoxidable es de polietileno flexible. (Emilio Gelpí.)

Siete hipótesis

La aparición de sedimentos enriquecidos en iridio ha sumado una nueva prueba a favor de algunas de las teorías que pretenden explicar las presuntas extinciones masivas que se dieron a finales del Mesozoico, hace de ello unos 63 millones de años. Muchas especies marinas de foraminíferos parecen desaparecer del registro fósil a finales del Mesozoico (transición que marca el límite entre el período Cretácico y el Terciario); lo mismo ocurre en especies vegetales terrestres y varios reptiles, incluidas todas las especies de dinosaurios del Cretácico. Walter Alvarez y sus colaboradores, de la Universidad de California en Berkeley, quienes descubrieron la anomalía del iridio, propusieron en 1980 que las extinciones resultaron de una colisión catastrófica entre la Tierra y un asteroide de unos 10 kilómetros de diámetro. No todos los paleontólogos aceptan esta explicación, pero la mayoría de las hipótesis propuestas toman ya en cuenta la prueba del iridio.

En la reunión anual de la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia (AAAS), celebrada el pasado enero, se presentaron siete hipótesis sobre esas extinciones. Alvarez fue uno de los ponentes; informó de un reciente descubrimiento que parece debilitar la hipótesis de su grupo acerca de la extinción catastrófica de los dinosaurios. En Hell Creek, un yacimiento rico en fósiles del nordeste de Montana, Alvarez y William Clemens, de Berkeley, hallaron un enriquecimiento de iridio en la base de un estrato de carbón vegetal fechado en el Paleoceno, la primera época del período Terciario. El fósil de dinosaurio más reciente de Hell Creek, un fémur de *Tyrannosaurus*, se halla tres metros por debajo de la capa de iridio, y hay fósiles de animales típicos del Paleoceno dos metros por debajo del estrato. De forma que, según las pruebas de Hell Creek, los dinosaurios de esta parte del Nuevo Mundo habían desaparecido bastante antes de darse el fenómeno que depositó el iridio.

Bajo la hipótesis de Alvarez, el mecanismo real de la extinción era el oscurecimiento de la radiación solar por nubes de polvo lanzado hacia la atmósfera. John O'Keefe, del Centro de Vuelos Espaciales Goddard, de la NASA, apoya un mecanismo similar, pero sugiere que la causa fue una erupción volcánica de la Luna.

Dewey McLean, del Instituto Politécnico y la Universidad estatal de Virginia, está también a favor de una catástrofe volcánica, pero la prefiere terrestre: la enorme erupción del Decán, que sepultó 300.000 kilómetros cuadrados del subcontinente indio bajo más de dos kilómetros de lava. La erupción masiva, propone McLean, saturó la atmósfera de dióxido de carbono y acidificó las aguas oceánicas, disolviendo los caparazones de los foraminíferos y provocando un "efecto invernadero" que resultaría fatal para los organismos terrestres. La hipótesis de McLean justifica también la capa de iridio sin recurrir a la colisión con un asteroide: habiéndose reducido sustancial-

mente las poblaciones oceánicas, la lluvia continua de micrometeoritos ricos en iridio alcanzaría el suelo oceánico sin diluirse entre la lluvia de esqueletos planctónicos, asimismo constante.

Stefan Gartner, de la Universidad de Texas A. & M., propone otro fenómeno catastrófico, que resultaría de la redistribución de continentes según la tectónica de placas. Durante el Cretácico, sostiene Gartner, el océano Artico era un lago interior que la persistente lluvia transformó de salado en salobre. Al separarse Groenlandia de Noruega, el agua ártica se liberó, formando una capa salobre de 150 metros de profundidad sobre la superficie de los demás océanos. El brusco cambio ambiental destruiría el plancton, interrumpiendo la cadena trófica oceánica y conduciendo a una masiva extinción marina. La disminución de la salinidad oceánica provocaría asimismo fluctuaciones de temperatura y pluviosidad que darían lugar a las extinciones terrestres.

Leo Hickey, de la Institución Smithsoniana, apoya la hipótesis gradualista de Clemens, pero puntualiza que el impacto de un asteroide de entidad menor, suficiente para oscurecer el cielo durante un breve período, quizá provocara las extinciones marinas. Por último, Thomas J. M. Schopf, de la Universidad de Chicago, sostiene que las supuestas extinciones masivas no fueron ni bruscas ni masivas. “La extinción forma parte del transcurso normal de la vida”, afirmó Schopf en la reunión de la AAAS. En cuanto a los dinosaurios, “tuvieron la desgracia de hallarse en el lugar y en el tiempo equivocados, destino que aguarda a todas las especies”.

Vehículo eléctrico urbano

En el Instituto de Investigación Aplicada del Automóvil de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona (IDIADA) está ensayándose un prototipo de vehículo eléctrico urbano, dotado con un equipo de tracción con motor de inducción controlado por microprocesador.

Al desarrollar un sistema de tracción por corriente alterna, lo que se pretende es conseguir una optimización del rendimiento del sistema y un peso y volumen menores que en los grupos de corriente continua. Estos últimos presentan un grave inconveniente en el colector y las escobillas: limitan la velocidad y la tensión, amén de exigir un mantenimiento y una revisión constantes.

¿Qué problemas plantea un sistema de tracción por corriente alterna? Los motores de corriente alterna con un grupo de tracción obligan a variar la frecuencia de la corriente de alimentación para que varíe la velocidad de rotación del motor, dificultad insuperable que motivó su abandono cuantas veces se planteó la posibilidad de su aplicación a escala industrial. Pero la aparición de los semiconductores de potencia, primero, y de los microprocesadores, luego, nos facultan ya para pensar en la obtención de la frecuencia variable a través de un convertidor estático controlado mediante técnicas digitales.

El equipo de trabajo del IDIADA realizó un estudio comparativo entre los parámetros físicos del motor y los parámetros físicos del convertidor al objeto de determinar cuál sería la mejor configuración que permitiera el menor peso y volumen a la vez que un alto rendimiento. Se arranca, en ese estudio, de un motor de corriente continua con troceador (chopper) de transistores para identificar el sistema óptimo de corriente alterna. Los convertidores

de potencia constan de tiristores y de inversor de transistores.

El motor de inducción y el de imán permanente son los que presentan las características más atractivas, si bien el motor de imán permanente precisa de un ondulador doble para suministrar las corrientes necesarias, ya que estos motores trabajan a baja tensión, lo que implica doblar el peso y el coste del inversor al tiempo que baja su rendimiento. El motor de inducción, de jaula de ardilla, y el inversor de transistores comportan un coste y un peso menor, unidos a un rendimiento mayor, que el resto del sistema.

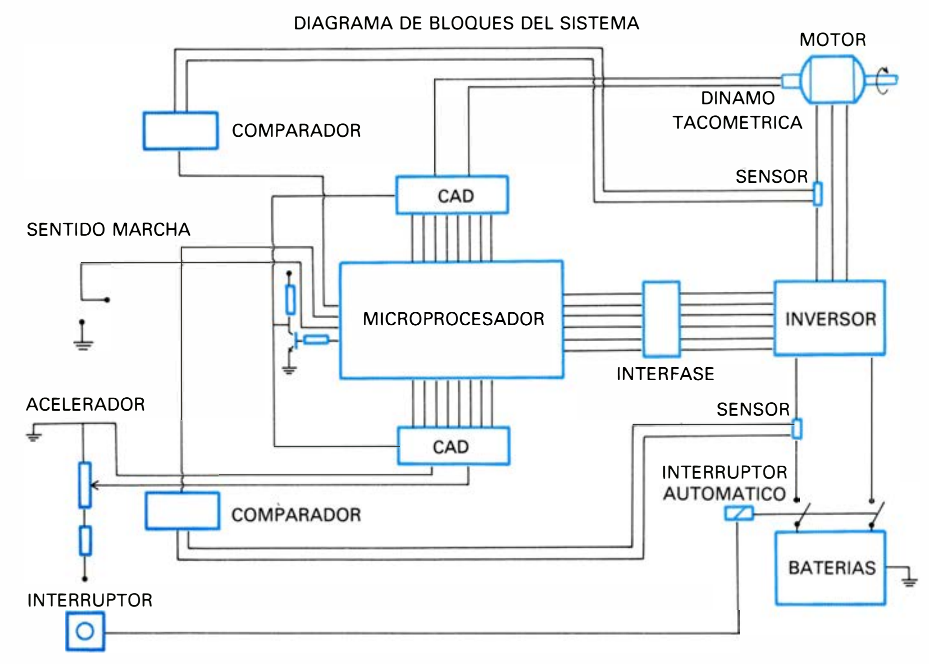
El coche prototipo que está desarrollando el IDIADA tiene una potencia nominal de 9,5 caballos de vapor en el eje motor. Potencia que se obtiene a partir de los 50 hertz; y se mantiene constante hasta los 160 hertz, frecuencia a la que se consigue la velocidad máxima. Por debajo de los 50 hertz, en que hemos fijado la frecuencia nominal del motor, la relación entre la tensión y la frecuencia, para conseguir un rendimiento óptimo, debe ser lineal, de suerte que el flujo en el entrehierro se mantenga constante. El rendimiento del conjunto motriz es del 87 por ciento en todas las zonas de funcionamiento, incluida la zona de frecuencias inferiores a la nominal.

El gobierno externo se obtiene mediante un acelerador-freno y una palanca, tipo cambio de velocidades, para seleccionar la marcha hacia delante o hacia atrás. La señal de aceleración nos la da el ángulo del pedal respecto a la posición de reposo del mismo, señal que se interpreta como la velocidad deseada por el conductor. El dispositivo se irá aproximando progresiva y rápidamente a la velocidad deseada. Si la real es más pequeña, el vehículo acelerará; si mayor, frenará. Para el conductor, se trata de un coche que funciona como un vehículo con motor de combustión interna, dotado de caja de cambios automática.

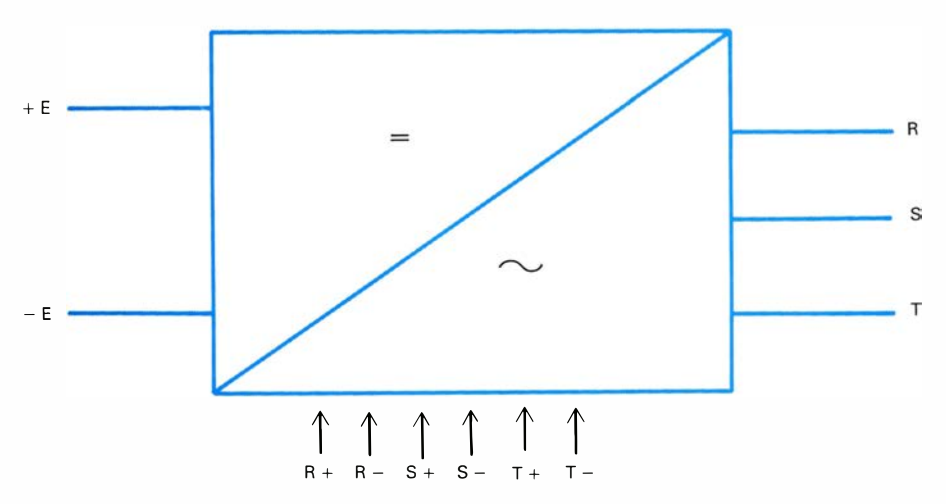
Del funcionamiento descrito del acelerador-freno se desprende que el vehículo acelerará o frenará de una manera más o menos brusca según se pise el pedal. La palanca de sentido de marcha sólo actúa cuando el vehículo está parado. Aunque el conductor ponga la "marcha atrás" mientras el vehículo se mueve hacia delante, el gobierno electrónico ignorará esa orden hasta que el vehículo se detenga. Basta acelerar nuevamente para invertir el sentido de la marcha.

El objetivo del sistema es conseguir en el eje del motor una velocidad regulable, entre 0 y 4000 revoluciones por minuto (rpm). Al utilizarse un motor de inducción de dos pares de polos, la frecuencia debe variar entre 0 y 160 hertz. Si sólo cambia la frecuencia por debajo de los 50 hertz, el flujo en el entrehierro crece sensiblemente y aumentan las pérdidas, lo que compromete el funcionamiento del motor a bajas revoluciones. El flujo en el entrehierro es función de la frecuencia y de la tensión, de acuerdo con la siguiente relación aproximada: $V = \varnothing_e w$, donde V simboliza la tensión eficaz en bornes del motor, $\varnothing_e$ el flujo en el entrehierro y w la pulsación de la corriente alterna de alimentación. Ecuación que no vale para frecuencias inferiores a los 12 hertz; en esa banda, de cero a 12 hertz, se opta por trabajar a tensión constante. Y a tensión trabajará también el grupo motriz desde los 50 hasta los 160 hertz.

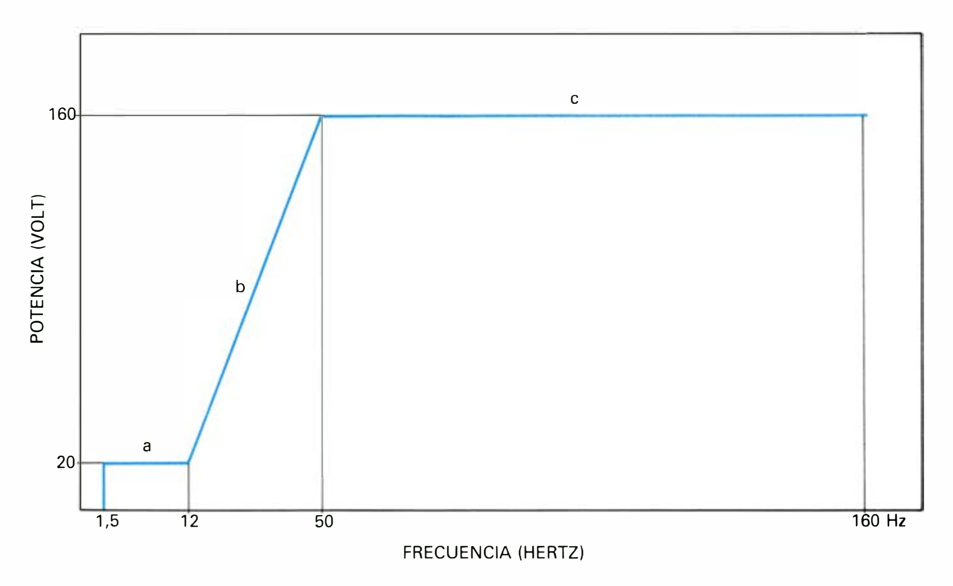
Hay, pues, tres zonas de funcionamiento: una de 0 a 12 hertz a tensión constante, correspondiente a la zona de arranque; de 12 a 50 hertz se trabaja a flujo constante, y corresponde a la zona de aceleración; por último, de 50 a 160 hertz se funciona a tensión constante para la marcha normal del vehículo. La unidad de gobierno, el microprocesador, es el encargado, de acuerdo con las órdenes recibidas, de variar la frecuencia y la tensión de la corriente de salida del ondulador.



El diagrama de bloques presenta el interconexionado entre los diferentes subsistemas del equipo, el subsistema digital (microprocesador, convertidores, comparadores, etcétera), el subsistema de potencia (baterías e inversor) y el subsistema mecánico (motor)



El inversor es el órgano electrónico bidireccional, encargado de comunicar el subsistema de corriente continua (+E, −E) con el subsistema de corriente alterna (R, S, T), mediante las señales de control en los canales R+, R−, S+, S−, T+, T−



Relación tensión-frecuencia, utilizada en el proyecto. Distinguimos tres zonas de funcionamiento: zona **a** *(entre 1,5 y 12 hertz), que es la zona de arrancada del motor, zona* **b** *(de 12 a 50 hertz), que es la zona de aceleración del vehículo, y la zona* **c***, la de marcha normal del coche*

La aceleración va ligada a la variación del deslizamiento. El par motor (C) se puede expresar como función del flujo en el entrehierro ($\varnothing_e$) y la pulsación de las corrientes rotóricas (w_r), función a su vez del deslizamiento. La expresión podría formularse así: $C = F(\varnothing_e, 1/w_r)$. Para acelerar más o menos se ha de modificar la diferencia entre el par resistente y el par motor. Al aumentar el deslizamiento (apretar el acelerador) disminuye w_r y, por tanto, aumenta el par motor. Cuanto más deprisa varíe la posición del acelerador tanto más deslizamiento habrá, más par y, por ende, mayor aceleración. ¿Cómo se manifiesta esta última? De la siguiente manera: aceleración de 0 a 45 kilómetros por hora en 9 segundos y aceleración inicial suficiente para arrancar en pendientes del 25 por ciento (salida de parkings). Hay que agregar además las ventajas de un mayor ahorro energético en paradas y arranques, que, con un frenado de recuperación, puede llegar hasta el 30 por ciento, la aplicación progresiva, sin escalonamientos, del esfuerzo de tracción, disminución de los gastos de mantenimiento, al desaparecer todo tipo de contactos y partes móviles, la eliminación de resistencias y, por último, mayor capacidad de frenado por recuperación.

¿Qué requerimientos presenta el convertidor de potencia? El convertidor de potencia para la tracción a corriente alterna ha de diseñarse de suerte que regenere totalmente la energía disponible del frenado, hacia la batería, y así aumentar la autonomía del vehículo. El convertidor utilizado entre la batería y el motor es un inversor trifásico: un dispositivo bidireccional capaz de poner en comunicación el sistema de corriente continua con el de alterna mediante unos impulsos de control. En el lado de continua la tensión es ±E, que podemos considerar constante e igual a la de la batería.

Hay seis canales de control (designados por R+, R−, S+, S−, T+ y T−), que conectan el convertidor con el equipo digital. Mediante un "uno" lógico en la entrada R+ se fuerza a la fase R a tomar el valor de tensión de +E. Esa misma señal en R− forzaría a R a tomar el valor −E, y análogamente para el resto de señales de control.

Más arriba indicamos que en la zona de 12 a 50 hertz se trabaja a flujo constante y que la alimentación es allí a tensión y frecuencia variables. Existen distintos métodos de modificar la tensión de salida de un ondulador. La mayoría de ellos exigen aumentar el número de semiconductores del dispositivo para formar montajes en puente. En el IDIADA se escogió el sistema de variación de la anchura de pulsos PWM (de "pulse width modulation"). La forma de onda obtenida entre fases es la que alimenta el motor en la zona de aceleración. Se modifica la tensión al aumentar los tiempos en que vale cero (disminuye la tensión eficaz) o decrementar dichos intervalos (sube la tensión eficaz). La amplitud de los pulsos es constante e igual a 2E.

El convertidor consta de seis módulos de conmutación, que deben manejar una carga inductiva como la del motor. Cada módulo posee dos transistores MOSFET (transistores de efecto de campo de tecnología MOS) de canal *n* y de un diodo de conmutación rápida en antiparalelo. Se necesita una pequeña circuitería en la puerta del transistor. El que se emplea en el IDIADA, muestra una baja impedancia de entrada en el instante de conexión y, por tanto, se carga rápidamente la capacidad de puerta del transistor.

El microprocesador recibe las señales del sistema y las procesa de forma que, dependiendo del estado actual y de las órdenes recibidas, generará las órdenes pertinentes y las enviará al ondulador. La señal de aceleración la transmite el acelerador, que se halla acoplado a un potenciómetro de precisión; de aquí se obtiene una imagen analógica (tensión) de la posición del acelerador, que se convierte a digital, en una palabra de ocho bits, imagen a su vez de la posición del acelerador. Esa velocidad deseada por el conductor se compara con otra palabra de ocho bits, imagen de la velocidad real, que es el resultado de la conversión de la respuesta analógica de un tacogenerador acoplado al motor. El microprocesador realiza, además, una retroalimentación de la tensión del motor. De acuerdo con esas dos realimentaciones, la aceleración o deceleración se llevará a cabo según en qué zona de funcionamiento se halle el vehículo.

Compete también al microprocesador controlar los límites de intensidad del motor y las baterías para que no se sobrepasen los límites físicos de los componentes, controlar también la palanca de cambio de sentido, los intermitentes, cuentakilómetros, velocímetro e información del estado de las baterías.

El IDIADA extiende su campo de investigación a la optimización de las baterías y a la parte mecánica del vehículo. En lo referente a aquéllas se pensó en un comienzo en las usuales de plomoácido para tracción, pero presentaban una pobre relación energía almacenada-peso. Algunos fabricantes han desarrollado prototipos en que se dobla esa relación; quizás ahí radique una solución. Por lo que concierne a la parte mecánica, las investigaciones se centran en la adopción de un diseño que presente buena accesibilidad, manejo cómodo del vehículo, fácil aparcamiento, etcétera, características imprescindibles para un vehículo pensado para uso urbano. El trabajo aquí reseñado mereció el premio ENHER 1981, concedido al autor de esta nota (F. X. Pastor.)

Oncogenes

Son genes que producen cáncer. Identificados primero en virus, de su historia evolutiva se deduce que las células normales de los vertebrados poseen genes cuya expresión anormal bien pudiera desencadenar el crecimiento tumoral

J. Michael Bishop

¿Podemos llegar a entender la célula cancerosa? Dado que nadie sabe todavía cómo controla su crecimiento una célula normal, puede parecer desvarío cualquier intento por descifrar las reglas anormales que dirigen el crecimiento de una célula cancerosa. Pero la historia de la biología reseña muchos casos en los que el estudio de las anomalías ha arrojado luz sobre los procesos normales de la vida. Los recientes descubrimientos en la investigación del cáncer han aportado otro ejemplo clamoroso de lo que venimos diciendo. Por vez primera, los estudiosos han podido vislumbrar un esbozo, más o menos difuso, de los sucesos que inducen el crecimiento de un tumor. Se han identificado qué enzimas catalizan esos acontecimientos y qué genes determinan la estructura de los enzimas en cuestión.

Esos avances llegaron a través del estudio de los virus que inducen la formación de tumores. En los últimos años se ha llevado a cabo una intensa búsqueda de virus que causen cáncer en humanos. Búsqueda infructuosa, empero, durante mucho tiempo, hasta el punto de infundir en el ánimo de no pocos la duda de que alguna vez hubiera que reconocer, a esos microorganismos, causa desencadenante de cáncer en humanos. Pero hay virus que sí inducen tumores en animales; los investigadores han estudiado esos virus tumorales al objeto de definir qué trastornos celulares importantes pudieran decidir el crecimiento canceroso. En esa búsqueda tenaz se ha encontrado, por fin, oro.

A pesar de que los genes implicados en el desarrollo del cáncer se observaron por primera vez trabajando con virus, no son nativos de estos microorganismos. Es más, se ha demostrado que tales genes ni siquiera son típicos de las células cancerosas. Se les halla, también en forma activa, en las células normales, y parecen tan imprescindibles para la vida de las células normales como para el desenfrenado crecimiento de un cáncer. El proceso final común tras el que surgen todos los tumores debe venir determinado por la dotación genética particular de cada célula.

Virus tumorales

Los virus no son más que paquetes de información genética encapsulada en una cubierta proteica. La información puede estar contenida en ADN o ARN. (En las células de organismos superiores se encuentran invariablemente en el ADN.) Tanto el ADN como el ARN son largas cadenas integradas por cuatro unidades químicas denominadas nucleótidos. La secuencia de nucleótidos constituye un mensaje codificado, hilvanado por unidades definidas llamadas genes. Las instrucciones contenidas en los genes pueden ejecutarse de diversas formas. Lo más frecuente es que la secuencia de nucleótidos especifique el orden en el que deben engarzarse los aminoácidos para formar una proteína, por lo común un enzima o una proteína estructural. Los virus pueden constar de menos de cinco genes, pero nunca encierran más de algunos centenares; las células de organismos más complejos, por contra, tienen un genoma, o complemento genético total, de decenas de miles de genes. La reproducción de los virus imita los procesos por los que crece y se divide la célula, pero la sencillez de esos microorganismos los hace más fáciles de estudiar y comprender que las células.

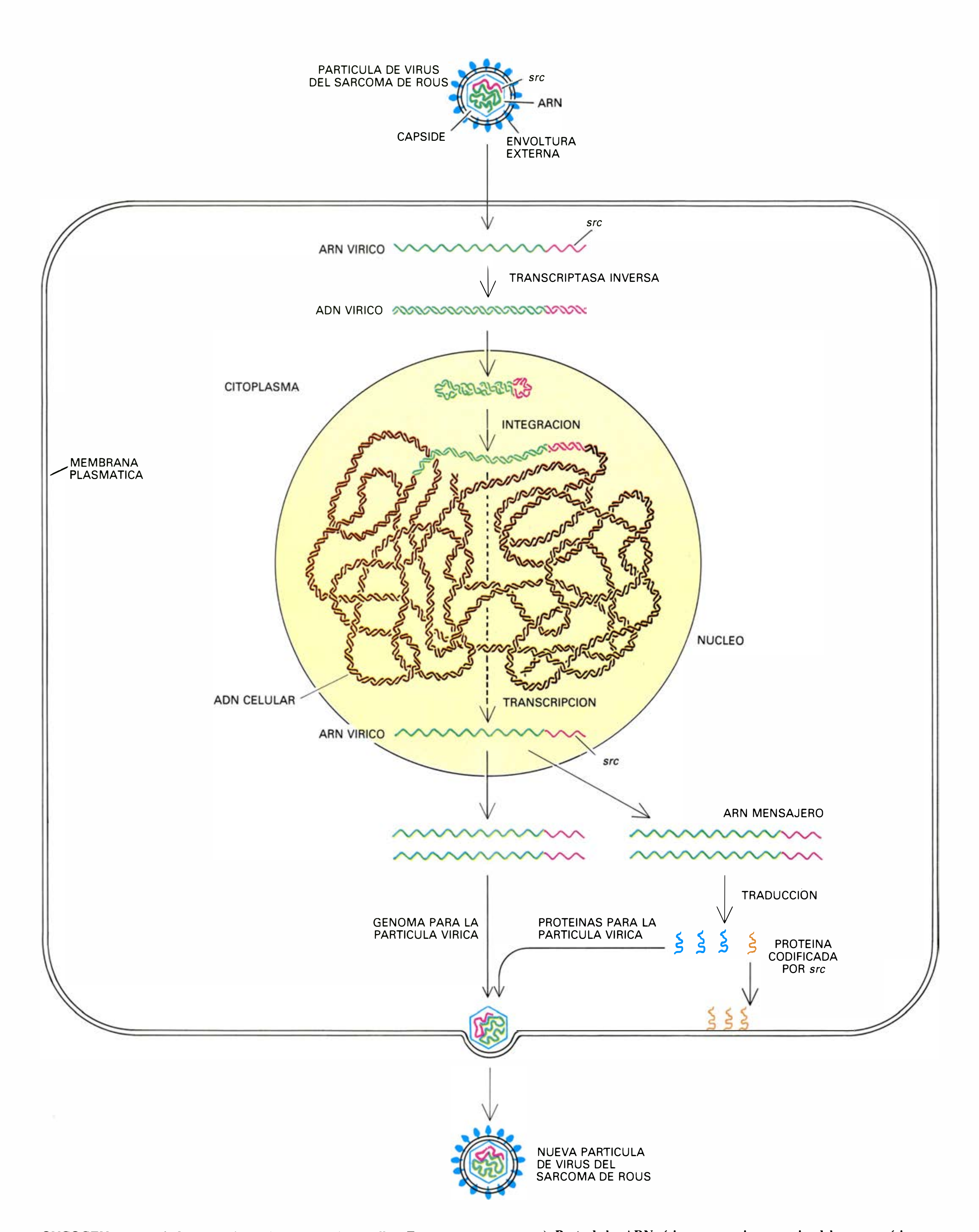
En las células, el ADN se transcribe en una cadena de ARN y, por traducción del ARN, da lugar a la proteína. Tras la infección, el virus introduce su información genética en la maquinaria celular. La célula sintetiza las proteínas víricas codificadas en los genes víricos. Estas proteínas sintetizan muchas copias del genoma vírico, construyen nuevas partículas víricas y ejecutan cualquier otra orden que pudiera estar determinada por los genes del virus. En algunos casos, entre estas instrucciones se incluye la de dirigir la célula huésped hacia un crecimiento canceroso.

La existencia de virus tumorales se sospechó por primera vez a principios de siglo. Un descubrimiento fundamental en este sentido tuvo lugar en 1910, cuando Peyton Rous, del Instituto Rockefeller de Investigación Médica, demostró que un filtrado libre de células de ciertos tumores de pollo, los llamados sarcomas, podía inducir nuevos sarcomas en dichas aves. Sus resultados fueron mal acogidos; Rous abandonaría sus trabajos sobre virus tumorales ante la desaprobación de sus colegas. Décadas más tarde, mediante purificación por procedimientos físicos y visualización al microscopio electrónico, se pudo demostrar sin ambigüedad la existencia real del virus identificado por Rous y la de otros virus tumorales. Los virus tumorales se convirtieron en sujetos habituales de la investigación del cáncer. En 1966, a los 85 años de edad, Rous recibió el premio Nobel.

Algunos virus tumorales son oncogénicos (es decir, inducen tumores) tan sólo en aquellos animales que no son sus huéspedes habituales en la naturaleza, mientras que otros lo son en su huésped habitual. Estas diferencias admiten una explicación parcial; en cualquier caso, no se trata de algo que preocupe sobremanera al investigador. La posibilidad de producir tumores a voluntad a través de un agente sencillo y definido ha servido de mucho en el estudio del cáncer, aun cuando en algunos casos sea necesario recurrir a una combinación absolutamente artificial de virus y célula huésped.

Transformación

Muchos virus tumorales tienen una propiedad particularmente útil: provocan cambios cancerosos en células cultivadas en un medio sintético. Esta



ONCOGEN *src*, que induce un cáncer (un sarcoma) en pollos. Forma parte del pequeño genoma de ARN del virus del sarcoma de Rous, que pertenece al grupo de los "retrovirus". Cuando un retrovirus infecta una célula, el enzima transcriptasa inversa, aportado por el virus, copia el ARN vírico en ADN de doble cadena. El ADN se arrolla en círculo y se integra en el ADN de la célula huésped. Al transcribirse el ADN huésped en ARN, mediante enzimas celulares (no mostrado en la figura), el ADN del virus se transcribe también (*flecha a trazos*). Parte de los ARN víricos proporcionan copias del genoma vírico que se incluirán en las nuevas partículas víricas, y parte se destina a la producción de ARN mensajero, que la maquinaria de biosíntesis de proteínas de la célula traduce en proteínas víricas. Algunas de estas proteínas se incorporan en las nuevas partículas víricas. El producto del gen *src*, sin embargo, no forma parte de la partícula vírica. Se trata de una proteína-quinasa, enzima que se fija a la superficie interna de la membrana plasmática y fosforila proteínas.

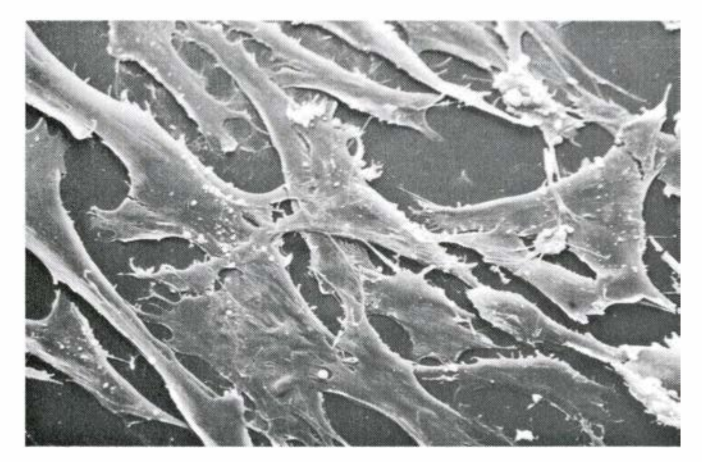
"transformación" celular in vitro permite examinar la interacción de un virus tumoral con la célula huésped en condiciones controladas, eliminándose así las dificultades que entrañan los experimentos con animales. Importa tener presente, sin embargo, que hay virus tumorales que no transforman las células desarrolladas en cultivo, por más que se muestren como poderosos agentes oncogénicos en animales.

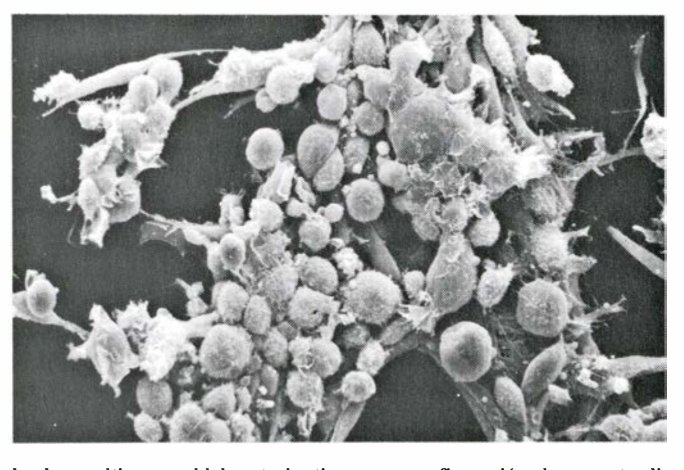
La capacidad e incapacidad de un virus para transformar células in vitro están relacionadas con su mecanismo de oncogénesis. Se han identificado dos pautas distintas. Algunos virus poseen un solo gen responsable de la inducción tumoral; otros presentan varios de estos "oncogenes". La acción de los oncogenes víricos es rápida y predomina sobre la actividad del resto de los genes que hay en la célula. Muchos virus con oncogenes (si no todos ellos) pueden transformar células in vitro; la capacidad de transformar manifiesta que el virus tiene un oncogén. Otros virus carecen de oncogenes e inducen tumores por vías más sutiles. Dichos virus tumorales actúan más lentamente en los animales; en muchos casos tardan de seis a doce meses en producir un tumor, período a contrastar con los breves días o semanas escasas que necesita un virus portador de oncogenes. Además, tampoco transforman células mantenidas en cultivo.

Ambas formas de oncogénesis se caracterizan por la permanencia del genoma vírico en la célula huésped mientras vive ésta. En muchos casos, el ADN vírico aparece integrado, unido químicamente, al ADN de la célula huésped, pero a veces el genoma de algunos virus tumorales sobrevive aislado en el interior celular y se replica independientemente. Se supone necesaria la permanencia del genoma vírico para la oncogénesis vírica al objeto de asegurar el influjo del oncogén en la célula o bien para mantener los efectos, menos directos, de aquellos virus que inducen la formación de tumores sin ser portadores de oncogenes. El misterio que rodea la oncogénesis vírica ha justificado que en ocasiones se enunciaran hipótesis basadas en mecanismos de "ataque y retirada", por los que una eventual infección vírica desencadenaría una secuencia de acontecimientos resultante en la aparición de un tumor, sin que tuvieran que permanecer necesariamente rastros del virus en la célula tumoral. Pero no disponemos de pruebas experimentales que apoyen con firmeza tales modelos.

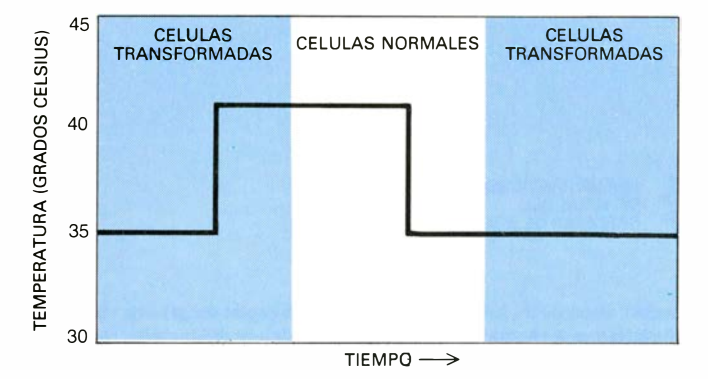
Retrovirus

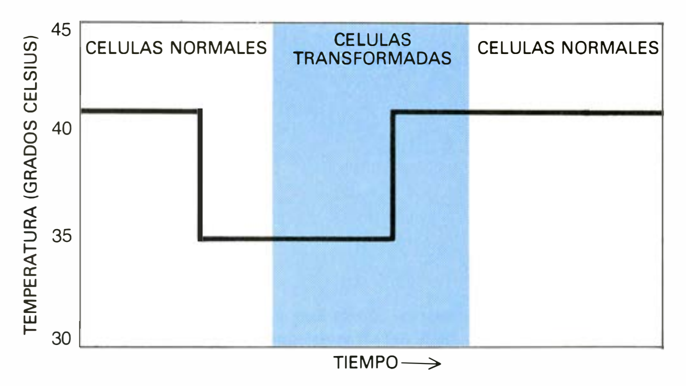
El virus del sarcoma descubierto por Rous pertenece a la familia de los retrovirus, los únicos virus conocidos que poseen un genoma constituido por ARN. Los retrovirus han proporcionado la más coherente visión de los oncogenes de que disponemos en la actualidad. A tres podemos reducir las características principales de los retrovirus que explican su utilidad en el análisis del desarrollo tumoral. En primer lugar, se han encontrado en un número elevado de especies de vertebrados, donde inducen muchos tipos de tumores; constituyen, pues, modelos experimentales de muchas de las formas más extendidas de cáncer humano. En segundo lugar, resulta relativamente fácil identificar y aislar oncogenes de retro-





TRANSFORMACION de células en cultivo por el virus del sarcoma de Rous, visualizada en estas micrografías electrónicas de barrido obtenidas por G. Steven Martin, de la Universidad de California en Berkeley. Los fibroblastos (células del tejido conjuntivo) normales se adhieren a la superficie de la placa donde se cultivan en el laboratorio; tienen una configuración plana y extendida (*izquierda*). Tras la infección por el virus del sarcoma de Rous las células se redondean y se amontonan formando racimos (*derecha*), debido, presumiblemente, a que el enzima codificado por *src* fosforila las proteínas celulares.





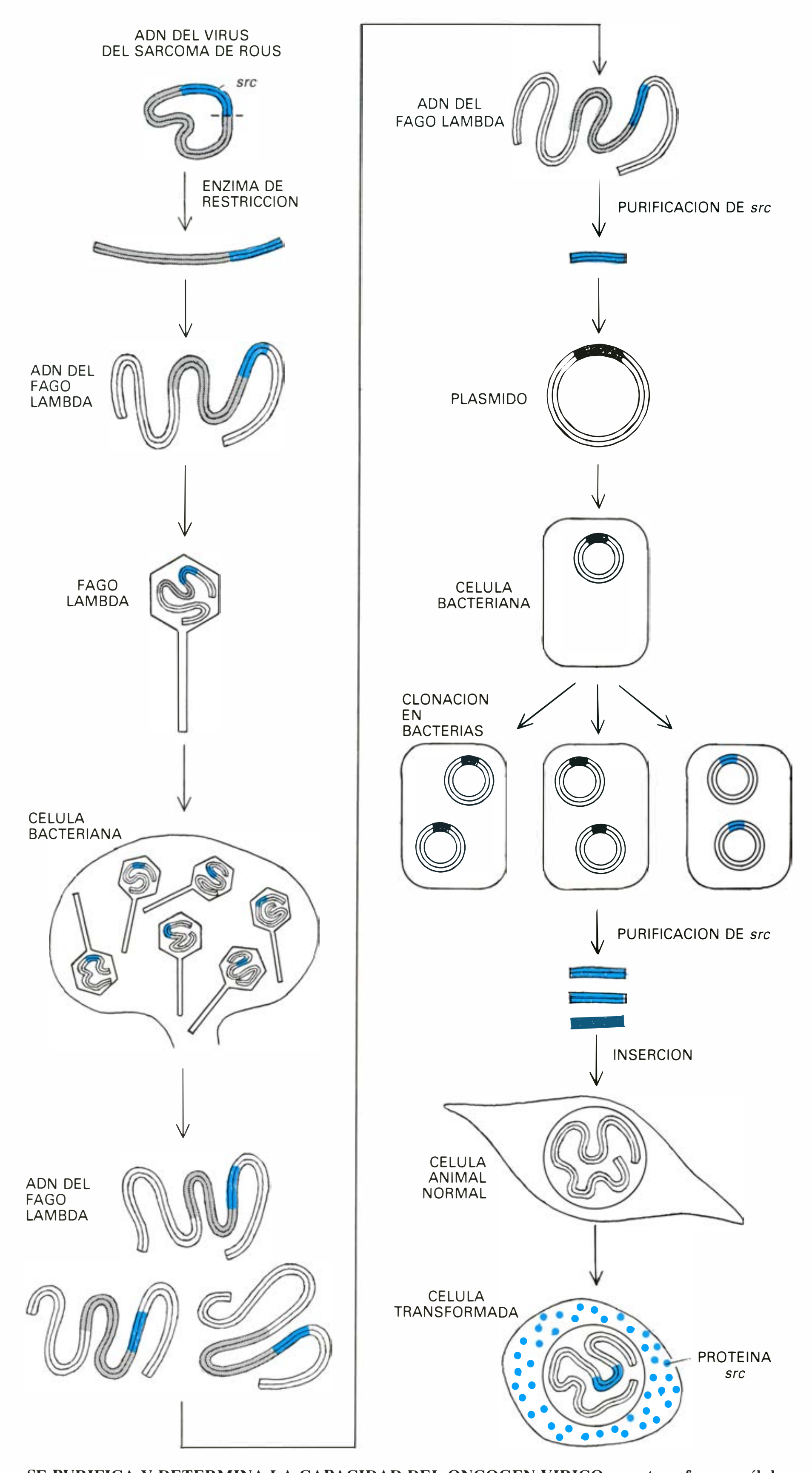
MUTACION CONDICIONAL de un gen, que provoca la inactivación reversible del gen o del enzima que aquel codifica. En el caso de un mutante de *src* sensible a la temperatura, las células infectadas se transforman cuando se cultivan a 35 grados Celsius, pero recuperan el estado normal (o permanecen en él) a 41 grados. El descubrimiento de tales mutantes implica que debe haber un gen vírico responsable de la transformación, que la actividad del gen ha de estar probablemente mediada por una proteína producto y que la persistencia de la actividad del gen resulta indispensable para la transformación.

virus y descubrir sus productos; de ahí que a ellos les debamos los primeros indicios de los procesos químicos responsables del desarrollo canceroso. En tercer lugar, los oncogenes de retrovirus no aparecen como componentes propios del genoma vírico; diríase, por contra, que se hubieran copiado de los genes de los huéspedes vertebrados en los que el virus se replica. Hay razones para sospechar que los genes celulares de los que aparentemente proviene el virus están asimismo implicados en la producción de tumores inducidos por agentes no víricos. Por ello, los especialistas en virus tumorales concentrados en el origen evolutivo de los oncogenes se han aplicado al estudio de mecanismos genéticos que puedan constituir la base de muchas formas de cáncer.

Los retrovirus reciben su nombre de una propiedad de su ciclo vital que les hace únicos en biología: su ARN debe transcribirse "hacia atrás" en ADN, mediante el que se propagan. Este proceso inusual se realiza por un enzima denominado transcriptasa inversa, descubierto en 1970 en ciertas partículas víricas, así el virus del sarcoma de Rous, por David Baltimore, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y por Satoshi Mizutani y Howard M. Temin, de la Universidad de Wisconsin. El descubrimiento tuvo enorme interés desde varios puntos de vista. Destruyó la errónea y ampliamente establecida hipótesis de que la información genética sólo podía fluir de ADN a ARN. Potenció sensiblemente la investigación de los retrovirus, al clarificar su mecanismo de replicación, tan oscuro hasta ese momento. Proporcionó, finalmente, un instrumento esencial para el desarrollo de la tecnología de la ingeniería genética con ADN recombinante.

El ciclo vital de un retrovirus es una maravilla de cooperación entre parásito y huésped. El éxito de la infección vírica depende tanto de la generosa hospitalidad ofrecida por la célula huésped cuanto de la capacidad del virus de mantener su autoridad en el control de los sucesivos acontecimientos. Durante las primeras horas de la infección, el genoma vírico de ARN se transcribe en ADN por acción de la transcriptasa inversa. El ADN vírico se integra a continuación en el genoma de la célula; y así, los genes del virus se replican conjuntamente con los genes celulares y son expresados por la maquinaria celular.

En muchos casos, una infección por retrovirus es inocua para la célula. El virus se instala en un nuevo hogar, que puede convertirse en permanente. Se producen nuevas partículas víricas que



SE PURIFICA Y DETERMINA LA CAPACIDAD DEL ONCOGEN VIRICO para transformar células mediante técnicas de ingeniería genética. El ADN circular del virus del sarcoma de Rous se aísla a partir de células recientemente infectadas, se corta con un enzima de restricción y se inserta en el ADN del fago lambda, un virus bacteriano. El cultivo del fago en bacterias permite obtener grandes cantidades del ADN vírico, que posteriormente se corta con un enzima de restricción para dar un fragmento que contiene exclusivamente *src* y una pequeña porción de secuencias de ADN contiguas. El fragmento se inserta ahora en un plásmido (pequeño círculo de ADN bacteriano), que se introduce en bacterias para su ulterior multiplicación (amplificación). De ese modo pueden obtenerse de los plásmidos muchas copias del fragmento de *src*, que se purifican y se introducen en células animales en cultivo. Este fragmento dirige la síntesis de una proteína vírica que induce transformación. El experimento fue realizado por William J. DeLorbe y Paul A. Luciw para demostrar que *src*, por sí mismo, causa el crecimiento canceroso.

abandonan la célula sin que ésta sufra daño alguno. Pero semejante colaboración puede fracasar en cualquier momento al producirse uno de los dos mecanismos de oncogénesis mencionados anteriormente. Si el virus carece de oncogenes, la integración del ADN vírico puede obstruir un gen celular en el punto de inserción o muy cerca de éste; en otras palabras, la inserción puede originar una mutación en el genoma de la célula huésped. En ciertos sitios, las mutaciones engendran crecimiento canceroso. La inducción de tumores por oncogenes y la inducción a raíz de la integración son, a primera vista, dos hechos muy diferentes; trataré de demostrar a continuación que guardan una relación muy estrecha.

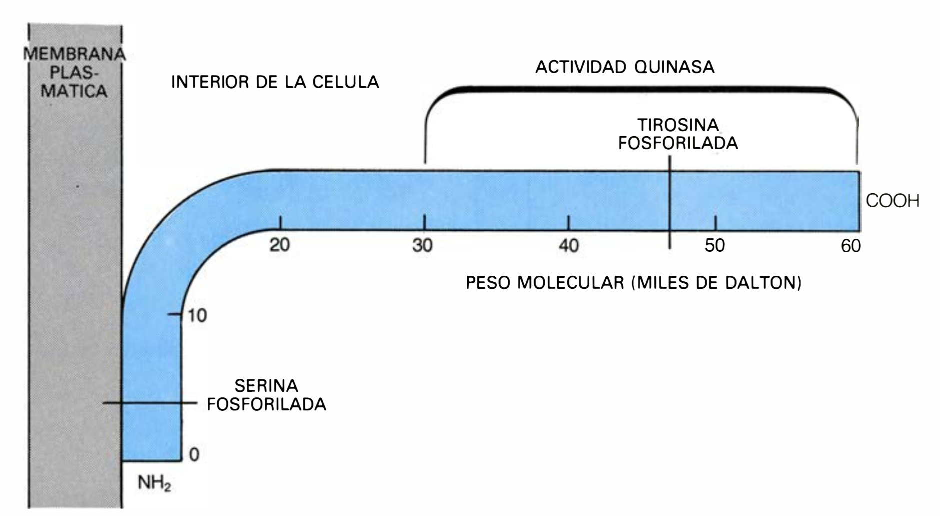
El gen *src*

El oncogén del virus del sarcoma de Rous fue el primero que se utilizó en el análisis experimental. En 1970, G. Steven Martin, de la Universidad de California en Berkeley, identificó ya mutantes "condicionales" sensibles a la temperatura, que afectaban a la capacidad del virus para transformar células in vitro. Era un gran paso. En efecto, una mutación condicional constituye un instrumento poderosísimo, pues permite la inactivación reversible de un gen. Cuando las células en cultivo se infectan por virus del sarcoma de Rous sensibles a la temperatura y se mantienen a la temperatura "permisiva", se transforman. Al modificar la temperatura por otra superior (o "restrictiva"), las células recuperan su aspecto normal en unas horas; sólo se transforman nuevamente cuando la temperatura desciende hasta el nivel primitivo. La interpretación de estos hechos es que, a la temperatura restrictiva, se inactiva un gen mutado. La transformación, por tanto, débese a la acción de un gen que ha de expresarse continuamente para mantener el estado canceroso. (En muchos casos, la temperatura alta no actuará, probablemente, de forma directa sobre el propio gen, sino que la mutación alterará la estructura de una proteína producto del gen, dando como resultado la inactivación de la proteína a la temperatura restrictiva.)

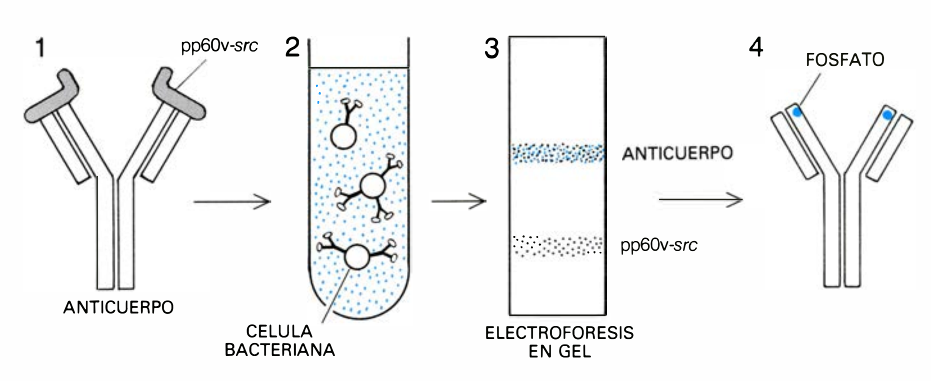
El gen que descubriera Martin se denomina hoy *src* (de sarcoma, el tumor que induce); se trata del oncogén del virus del sarcoma de Rous. El gen *src* se hizo más "tangible" poco después, a partir de los trabajos de Peter H. Duesberg, de Berkeley, y Charles Weissmann, Martin Billeter y John M. Coffin, de la Universidad de Zurich. Trabajaron con cepas de virus del sarcoma de Rous que habían sido aisladas por Peter K. Vogt, de la Universidad de California del Sur. Las cepas eran mutantes "delecionados" que habían perdido el oncogén, incapaces, por tanto, de inducir tumores o de transformar células en cultivo. Duesberg y Weissmann y colaboradores fragmentaron los genomas de los mutantes delecionados y de los virus silvestres (oncogénicos) con el enzima ribonucleasa. La determinación del fragmento ausente en los mutantes les permitió identificar el oncogén como un segmento de ARN cercano a un extremo del genoma del virus del sarcoma de Rous.

Durante los últimos años se ha venido recurriendo insistentemente a las nuevas y poderosas técnicas de la ingeniería genética para definir los oncogenes de una manera más precisa, así como para ensayar su potencial cancerígeno. El ADN se corta ya por sitios específicos con la ayuda de una serie de enzimas denominados endonucleasas de restricción. Los fragmentos específicos se obtienen, en grandes cantidades, a partir de cultivos bacterianos, se aísla de nuevo y reinserta en células en cultivo, donde se expresan los genes contenidos en el ADN. Podemos cortar, pues, el ADN vírico en fragmentos de suerte que cada uno contenga un único gen y concluir cuál de ellos es el responsable de la transformación. El análisis del ADN del virus del sarcoma de Rous ha revelado que basta un solo gen para transformar la célula; el gen codifica una proteína producto. ¿Qué significa ello? Que un único gen, que determina la síntesis de una proteína específica, puede realizar los cambios que definen una célula tumoral. Conocer de qué proteína se trata y cómo actúa es tener a la vista los procesos involucrados en la aparición de un tumor maligno.

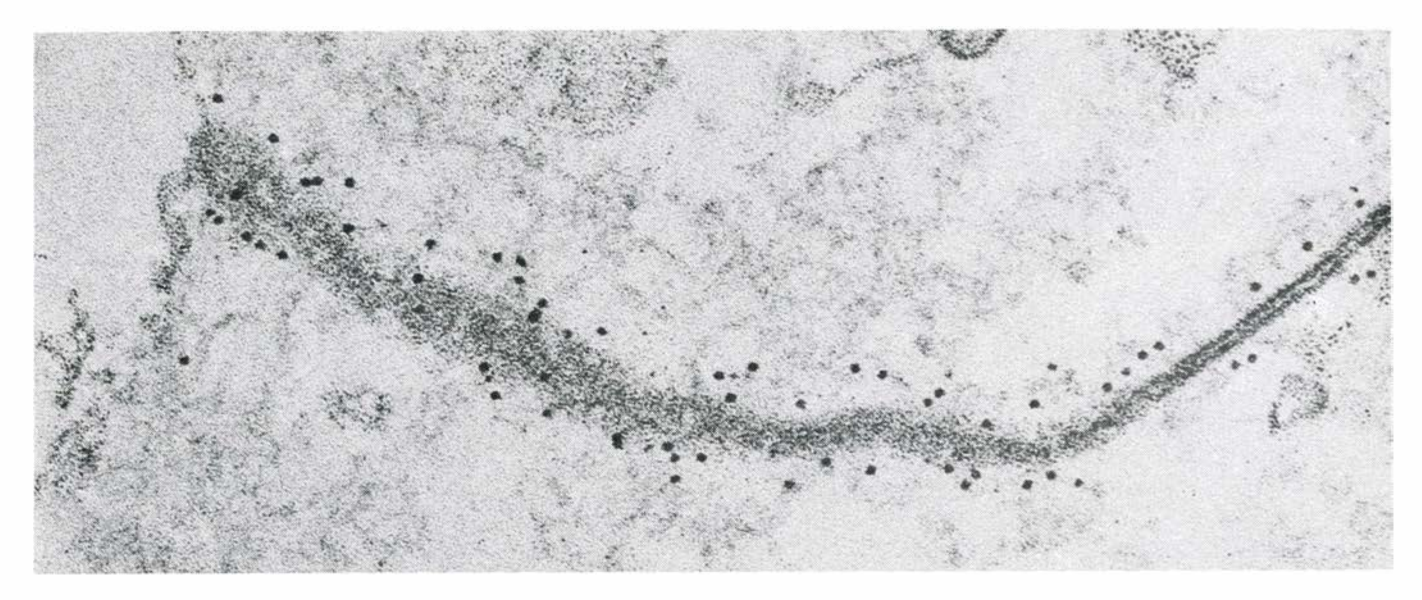
Se conoce la proteína determinada por *src*, gracias, en gran parte, al trabajo de Raymond L. Erikson, de la Fa-



EL PRODUCTO DEL ONCOGEN, una proteína denominada pp60v-*src*, es una cadena de unos 520 aminoácidos. Se trata de una proteína-quinasa, que cataliza la adición de grupos fosfato a las proteínas. La proteína está unida a la membrana plasmática por una parte cercana al extremo amino; el sitio de fosforilación reside en la otra mitad de la molécula. El enzima está fosforilado en dos aminoácidos.



ACTIVIDAD PROTEINA-QUINASA de pp60v-*src*, identificada por mero azar. Los conejos en que se han inducido tumores por el virus del sarcoma de Rous producen anticuerpos contra pp60v-*src* y los anticuerpos forman complejos con la proteína (*1*). Los complejos se inmovilizaron en la superficie de bacterias; se añadió luego una fuente de fosfatos marcados radiactivamente (*puntos coloreados*) (*2*). Cuando pp60v-*src* y el anticuerpo se separaron mediante electroforesis en gel, la banda del anticuerpo aparecía marcada radiactivamente (*3*): pp60v-*src*, inmovilizado, había catalizado la transferencia de fosfato al aminoácido tirosina en un sitio único de cada una de las dos cadenas pesadas del anticuerpo (*4*).



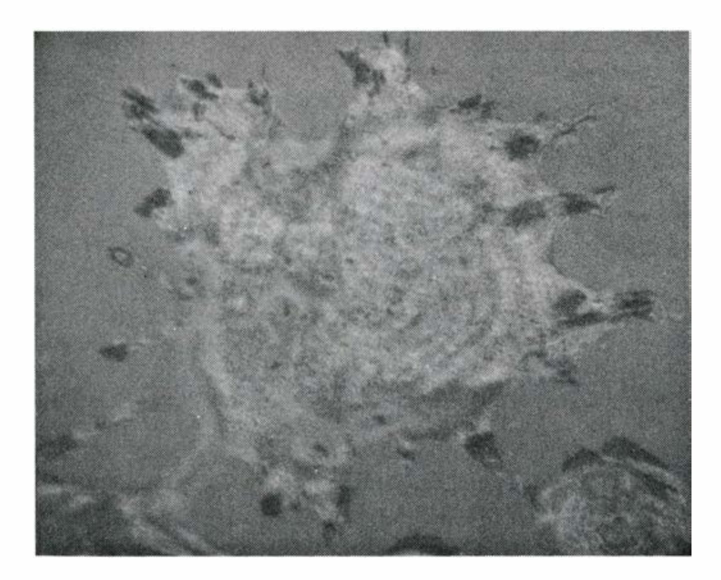
LOCALIZACION de la mayoría de la proteína *src*; se aprecia en esta micrografía electrónica obtenida por Mark C. Willingham e Ira H. Pastan, del Instituto Nacional del Cáncer. Se prepararon cortes muy finos de las células infectadas por el virus del sarcoma de Rous y se trataron con un anticuerpo de conejo contra pp60v-*src*. Al anticuerpo se le fijó ferritina (a través de un segundo anticuerpo), una sustancia opaca a los electrones. El anticuerpo de conejo se unió a pp60-*src*, cuya localización a lo largo de las membranas plasmáticas de dos células adyacentes señalan los puntos oscuros de ferritina.

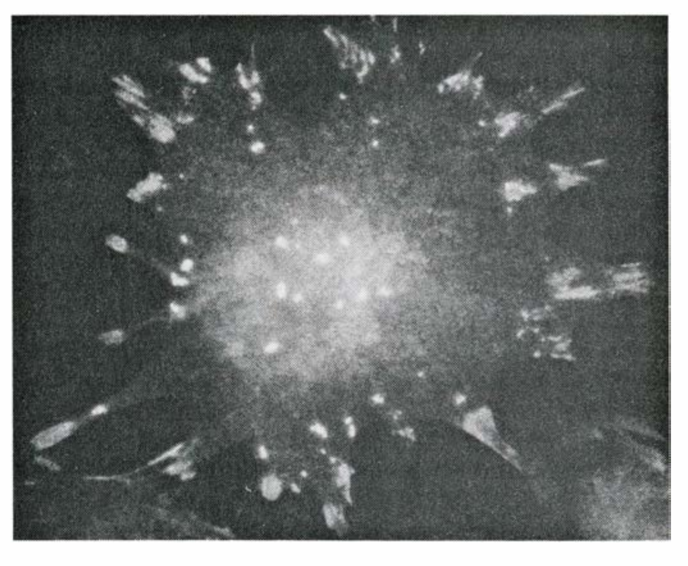
cultad de Medicina de la Universidad de Colorado, y sus colegas. Comenzaron por identificar una proteína que se sintetizaba en el tubo de ensayo bajo las instrucciones del genoma del virus del sarcoma de Rous silvestre, pero no bajo las instrucciones del genoma del mutante delecionado carente de *src*. Después prepararon anticuerpos de conejo frente a una presunta proteína *src*, mediante inducción de tumores en conejos con el virus del sarcoma de Rous. Los anticuerpos reaccionan específicamente con la proteína sintetizada en el tubo de ensayo y con una proteína idéntica presente en células transformadas por *src*. Estos hallazgos identificaban convincentemente una proteína codificada por *src*, responsable de los efectos del gen. A la proteína se le puso el nombre de pp60v-*src*; "pp" significa que se trata de una fosfoproteína (una proteína con grupos fosfato), el "60" remite a su peso molecular, de 60.000 dalton, y "v-*src*" indica su origen genético: el gen vírico *src*.

Un enzima cancerígeno

¿Cómo puede la proteína producto del gen *src* torcer el rumbo normal de una célula hacia su crecimiento canceroso? Por los días en que se aisló la proteína, era ésta una cuestión sin visos de respuesta. Mas, muy pronto se dio con una solución provisional al descubrirse que pp60v-*src* era una quinasa de proteínas: un enzima que agrega iones fosfato a los aminoácidos componentes de las proteínas en la reacción conocida como fosforilación. El descubrimiento se debió a Erikson y su colega Mark S. Collett e, independientemente, a Arthur Levinson, que trabajaba con Harold E. Varmus y conmigo en el laboratorio de la Facultad de Medicina de la Universidad de California en San Francisco.

Poco después Tony Hunter y Bartholomew M. Sefton, del Instituto Salk de Estudios Biológicos, describieron que





PLACAS DE ADHESION, que sirven para anclar las células a superficies. Sufren directamente el efecto de pp60v-*src*, como se demuestra en estas micrografías tomadas por Larry R. Rohrschneider, del Fred Hutchinson Cancer Research Center. En una micrografía por interferencia-reflexión (*izquierda*) las placas de adhesión, que están en contacto con la superficie, aparecen oscuras. Cuando la misma célula se trata con un anticuerpo contra pp60v-*src*, marcado con un colorante fluorescente, la micrografía al ultravioleta (*derecha*) muestra que la mayor parte de la proteína se localiza en las placas.

pp60v-*src* unía iones fosfato específicamente al aminoácido tirosina. Este hecho desplazó a pp60v-*src* de la clase de proteína-quinasas conocidas hasta entonces, que fosforilaban los aminoácidos serina y treonina. La fosforilación de tirosina se ha manifestado como un rasgo compartido por todos los enzimas codificados por oncogenes. Para mayor sorpresa interviene también en la regulación del crecimiento de células normales.

No hace todavía muchos años, los biólogos consideraban el fosfato como un material vulgar y, su transferencia a proteínas, una reacción modesta. Hoy, sin embargo, está fuera de toda duda que la fosforilación de proteínas constituye uno de los mecanismos principales de regulación de las actividades de las células en crecimiento. Un enzima que fosforile diversas proteínas puede alterar grandemente el funcionamiento de una célula. En el caso de pp60v-*src* se han propuesto dos mecanismos de acción. El enzima podría fosforilar una proteína única y precipitar una cascada de reacciones que, en conjunto, originaran las propiedades de una célula cancerosa; la otra posibilidad sería que el enzima fosforilase numerosas proteínas, afectando directamente las funciones de cada una de ellas y, quizá, precipitando acontecimientos secundarios o incluso cascadas, a su vez. Por lo que sabemos, muy poco aún, la segunda alternativa ofrece una mayor verosimilitud a la hora de la acción de pp60v-*src*.

¿Le viene al *src* su capacidad inductora de tumores de la fosforilación de las subunidades de tirosina presentes en las proteínas celulares? Hunter y colaboradores han demostrado que la cantidad de tirosinas fosforiladas en una célula se multiplica por diez a raíz de la transformación por *src*. Este aumento se contempla como una manifestación de la actividad de pp60v-*src*. Hay otras cuestiones fundamentales pendientes: ¿qué proteínas celulares fosforila el enzima y cuáles son sus funciones? Sólo disponemos de indicios, ninguno de los cuales puede justificar el crecimiento incontrolado de los tumores inducidos por *src*. La búsqueda de lugares de acción específicos para pp60v-*src* se lleva a cabo activamente en muchos laboratorios.

Sitio de acción

Una manera de abordar el problema consiste en acotar el sitio de la célula donde actúa pp60v-*src*, y descifrar así qué proteínas son las interesadas y cuál el papel desempeñado por ellas. Estudios iniciales habían señalado que los productos de los oncogenes víricos podrían asentarse en el núcleo celular, donde actuarían obstruyendo el aparato responsable de la replicación del ADN celular, lo que resultaría en un crecimiento incontrolado de la célula. Los experimentos de Hartmut Beug y Thomas Graf, del Instituto Max Planck para Investigación de Virus de Tübingen, mostraron, sin embargo, que los efectos de la proteína *src* podían detectarse incluso en células a las que se había extirpado el núcleo. A nadie sor-

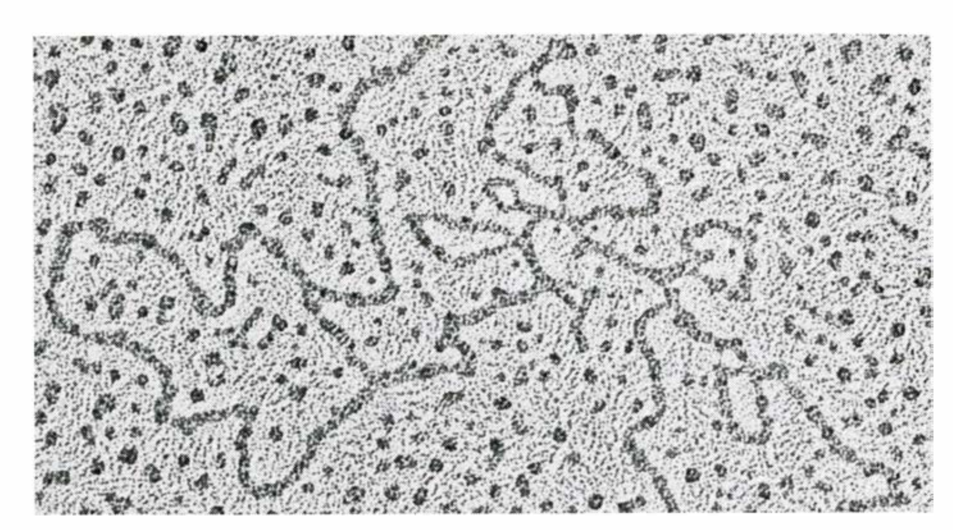
MUESTRA RADIACTIVA para buscar *src* en células normales, preparada por Dominique Stehelin. El ARN que contiene el gen v-*src* se aisló del virus del sarcoma de Rous (*arriba, a la izquierda*) y se copió en ADN por medio de la transcriptasa inversa en presencia de precursores de ADN radiactivos. Los fragmentos de ADN radiactivo resultantes (*en color*) se desnaturalizaron (se separaron las dos cadenas complementarias) y se mezclaron con ARN (*arriba, derecha*) extraído de un virus mutante que carece de v-*src*. Las cadenas separadas del ADN "hibridarán" con otras cadenas de ADN o de ARN que contengan secuencias similares. La mayoría del ADN radiactivo hibridó en esas condiciones con el ARN del mutante delecionado, pero los fragmentos de *src* no pudieron hibridar al no encontrar ARN complementario. Los híbridos de ADN-ARN se separaron del ADN de *src* mediante cromatografía en columna, con lo que se obtuvo una muestra de *src* radiactivo. Cuando la muestra se mezcló (*abajo, derecha*) con ADN normal de pollo, formó híbridos, poniendo así de manifiesto la presencia de un proto-oncogén que se denominó c-*src*.

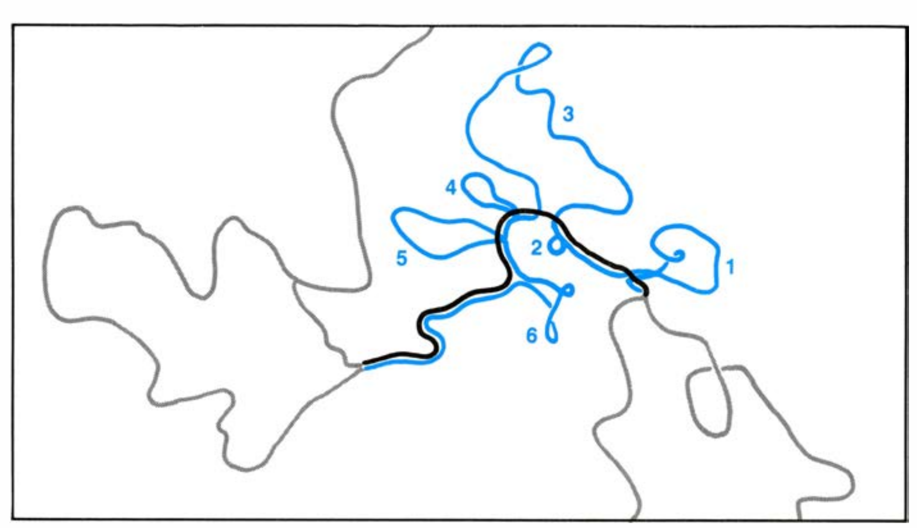
prendió, por tanto, que varios investigadores afirmaran que pp60v-*src* apenas si se detectaba en el núcleo. La mayor parte de la proteína se encontró en el otro extremo de la célula: unida a la membrana celular, la delgada película que engloba a la célula y que sirve de mediadora de sus interacciones con el mundo exterior. Muchos citólogos han avanzado la idea de que el control del crecimiento celular quizá resida en la membrana plasmática y estructuras asociadas.

El estudio de las membranas plasmáticas de células transformadas por *src* aportó la primera correlación entre la acción de pp60v-*src* sobre una proteína celular específica y uno de los cambios típicos en estructura y función observados en las células cancerosas. Mediante técnicas especializadas de fotomicroscopía, Larry R. Rohrschneider, del Centro de Investigación del Cáncer Fred Hutchinson, de Seattle, llegó a demostrar que pp60v-*src* se concentraba en las placas de adhesión, regiones de la membrana que se adhieren a las superficies sólidas. En las células cancerosas, las placas de adhesión se desmoronan; la pérdida de adherencia celular resultante facilita, cabe presumirlo, que la mayoría de las células cancerosas se separen de su tejido de origen y metastaticen hacia otros sitios.

Los hallazgos de Rohrschneider sugerían que pp60v-*src* podría deteriorar las placas de adhesión por fosforilación de uno de los componentes proteicos o, tal vez, de varios de ellos. Profundizando más en la idea, Sefton y S. J. Singer, de la Universidad de California en San Diego, mostraron que pp60v-*src* fosforilaba un residuo de tirosina de la vinculina, proteína que forma parte de las placas de adhesión normales y que aparece dispersa por toda la célula tras la transformación por *src*. Parece razonable pensar que la fosforilación de vinculina acelera la descomposición de las placas de adhesión; pero la trascendencia de estos hechos sobre el comportamiento incontrolado de las células cancerosas está todavía por demostrar.

Se creía antes que los efectos oncogénicos de los virus podían ser manifestaciones secundarias de genes víricos cuya principal misión era la de colaborar en la producción de nuevas partículas víricas. Hoy es un hecho establecido que la replicación de los retrovirus transcurre normalmente en ausencia de oncogenes. ¿Cómo explicar entonces la alta frecuencia con que aparecen oncogenes en retrovirus y su manifiesta conservación en el transcurso de la evolución? Tras diez años de investigaciones





ONCOGENES VIRICOS Y CELULARES, según se observan en la micrografía electrónica obtenida por Richard C. Parker. El ADN vírico, portador del gen *src*, y el ADN de pollo, que contiene la versión celular del mismo gen, se aislaron y desnaturalizaron luego para separar las cadenas del ADN. Se procedió después a hibridar las cadenas separadas. En este caso, como se muestra en la figura, el gen vírico (*negro*) y el celular (*color*) formaron un heterodúplex (una doble hélice cuyas cadenas tienen origen distinto). (El ADN ajeno que se requiere para la clonación de los genes se representa en gris.) Los bucles que se observan en la cadena de ADN celular son seis intrones, o secuencias intercaladas que interrumpen las secuencias que codifican la información para la síntesis de la proteína (exones) y que se encuentran en muchos genes celulares, pero no en los de retrovirus. Las micrografías de este tipo ayudaron a establecer que los oncogenes de las células son genuinamente celulares y no habían sido introducidos por virus.

se ha llegado a un resultado sorprendente. Los oncogenes de retrovirus son, lisa y llanamente, genes celulares camuflados, pasajeros captados de los animales en que los virus se replican. El descubrimiento de que las células poseen también oncogenes tiene implicaciones que escapan al simple ámbito de la virología de los tumores.

Origen de los oncogenes

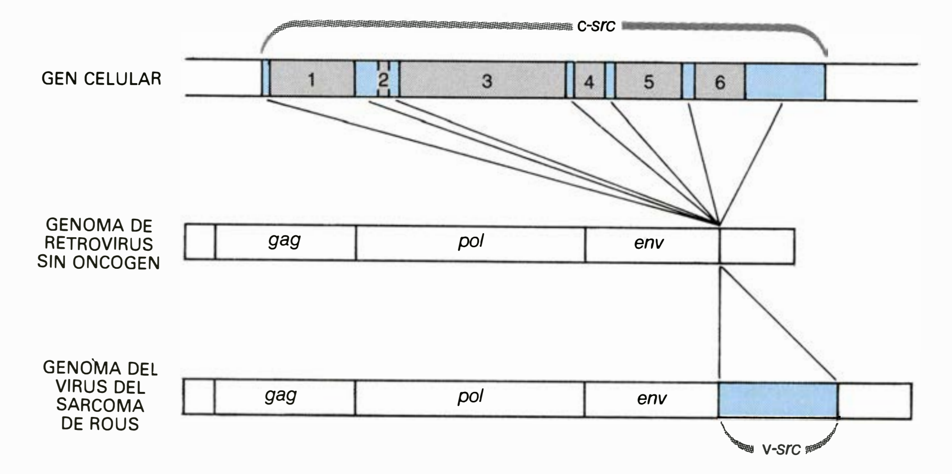
En 1972, Dominique Stehelin, Varmus y el autor decidieron explorar la "hipótesis del oncogén" propuesta por Robert J. Huebner y George J. Todaro, del Instituto Nacional del Cáncer. En su búsqueda de un mecanismo que explicara la inducción del cáncer por múltiples agentes distintos, Huebner y Todaro sugirieron que los oncogenes de retrovirus constituían parte del repertorio genético de todas las células, adquiridos, quizás, a través de infecciones víricas en los primeros estadios de la evolución. Los oncogenes serían inocuos mientras permanecieran en un estado inactivo. Guardarían, empero, íntegra su capacidad de encaminar las células hacia un crecimiento canceroso en cuanto los activara un agente carcinogénico. Y siguiendo con el razonamiento llegamos a la conclusión de que si dicha hipótesis era cierta, el gen *src* debería hallarse en el ADN de células normales.

El ADN de vertebrados contiene decenas de miles de genes. ¿Cómo descubrir a *src* entre esa enorme maraña? Stehelin preparó un poderoso instru-

mento: ADN copiado exclusivamente de *src* por la transcriptasa inversa [*véase la ilustración de la página 58*]. El ADN copiado sirvió de sonda para localizar zonas del ADN celular con secuencias de nucleótidos similares a las de *src*. La búsqueda se realizó por hibridación molecular, en la que las cadenas de un ácido nucleico (tanto el ADN como el ARN) hibridan, o forman complejos, con los ácidos nucleicos que poseen secuencias similares o muy relacionadas. Nos sentimos realmente entusiasmados (y sinceramente sorprendidos) al comprobar que la copia de *src* preparada por Stehelin podía hibridar con ADN de pollos y otras aves no infectadas. Deborah H. Spector se nos unió. Proseguimos la "caza" de ADN relacionado con *src* en mamíferos, incluyendo humanos, y en peces. Esta fue nuestra conclusión: todos los vertebrados poseían, probablemente, un gen relacionado con *src*; valía decir, pues, que la hipótesis del oncogén de Huebner-Todaro podría ser correcta.

Así las cosas, estudios más precisos demostraron que el gen que habíamos descubierto en vertebrados no era realmente ningún oncogén, sino un gen celular, conocido hoy con el nombre de c-*src*. La prueba más sólida en pro de semejante afirmación vino del descubrimiento siguiente: la secuencia de c-*src* que determinaba la proteína estaba dividida en varias zonas separadas, llamadas exones, intercaladas por otras regiones, los intrones. Dicha configuración fragmentada es típica de los genes animales, pero no de los genes de retrovirus. Con excepción de sus intrones, las versiones de c-*src* encontrados en peces, aves y mamíferos estaban íntimamente relacionadas entre sí y con el gen vírico v-*src*. Parece, pues, que el gen *src* de vertebrados ha sobrevivido a largos períodos evolutivos sin sufrir cambios importantes, de lo que se deduce que debe tratarse de un gen muy importante para el mantenimiento de las especies en que persiste.

El misterio que presentó *src* se hizo más profundo con la observación de que el gen no solamente "se hallaba" en las células normales, sino que incluso era activo, es decir, se transcribía normalmente en ARN mensajero y el ARN se traducía dando lugar a la proteína. Mediante la hibridación molecular con la copia radiactiva de v-*src* preparada por Stehelin, pudo demostrarse primero la presencia de ARN, tanto en mamíferos como en aves. La proteína era más difícil de detectar, debido, sobre todo, a que se sintetiza en muy pequeñas cantidades en la mayoría de las células. El éxito en este sentido se obtuvo cuando nuestro grupo (y otros investigadores también) trató de identificar la proteína celular con el empleo de anticuerpos, que habían sido preparados en un principio para la búsqueda de la proteína vírica transformante, pp60v-*src*; la proteína celular aislada con ayuda de estos anticuerpos mostró ser prácticamente idéntica a la vírica, y así lo refleja el nombre recibido: pp60c-*src*. Ambas proteínas son similares en tamaño y estructura química; las dos catalizan la fosforilación de tirosina y se encuentran fuertemente unidas a la membrana plasmática de las células (células transformadas en el caso de pp60v-*src* y células normales en el caso de pp60c-*src*). Todo parece indicar que las dos proteínas fueron diseñadas originalmente para cumplir una misma función, si bien una es una proteína vírica que causa cáncer y la otra una proteína de las células normales.

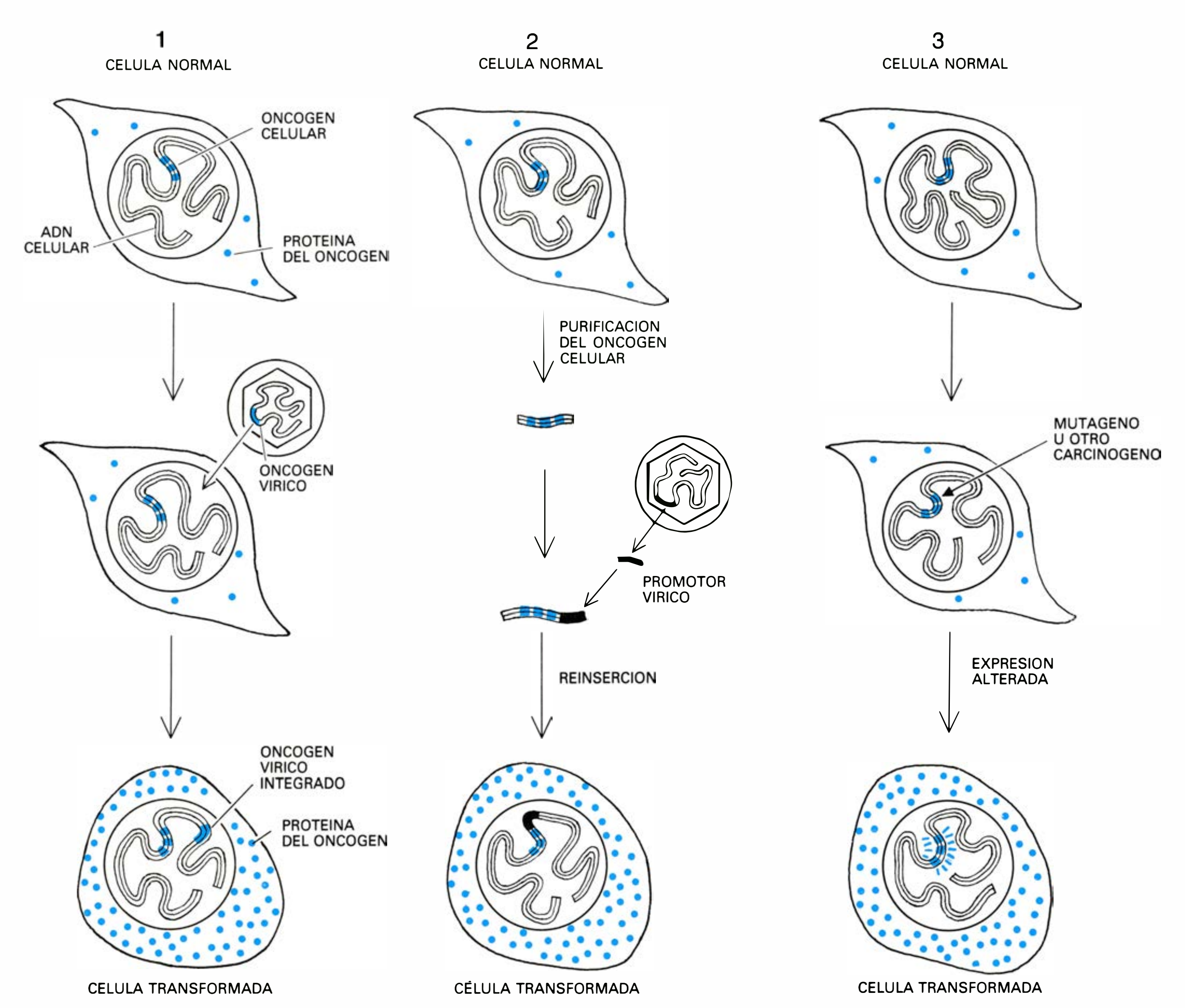


GEN FRAGMENTADO CELULAR c-*src* (*arriba*), que consta de exones (*color*) y de intrones (*gris*). El gen celular fue captado por retrovirus preexistentes. Tras eliminar los intrones, se empalmaron todos los exones y se insertaron en el genoma vírico (*centro*), completándose el genoma del virus del sarcoma de Rous (*abajo*). Además de *src*, los genes representados aquí son: *gag*, que determina la proteína de la cápside vírica; *pol*, que codifica el enzima transcriptasa inversa y *env*, que determina las espículas glicoproteicas de la envoltura vírica. Otros oncogenes de retrovirus puede que tengan un origen similar.

Oncogenes celulares

Los hallazgos registrados en torno a *src* constituyeron la primera señal de una generalización cuya significación y alcance no han podido establecerse todavía. De los 17 oncogenes de retrovirus identificados hasta el momento, en 16 casos se han podido encontrar parientes cercanos en los genomas de las células normales de vertebrados. La mayoría de esos parientes cercanos celulares de los oncogenes víricos siguen los mismos principios que se habían deducido en principio para c-*src*. Su organización estructural recuerda más la de genes celulares que la de genes víricos; parecen haber sobrevivido a largos períodos de evolución y son activos en células normales. Para explicar estos hechos, así como la notable similitud entre los oncogenes víricos y sus equivalentes celulares, la mayoría de los virólogos han optado por aceptar la idea de que los oncogenes de retrovirus son copias de los genes celulares. Pudiera ser que los oncogenes se hubieran añadido a genomas de retrovirus preexistentes en un momento no demasiado lejano de la evolución. No conocemos cómo ni por qué los retrovirus han copiado genes celulares. Pero hay razones para pensar que este proceso de copiado prosigue y que tal vez se consiguiera reproducirlo en el laboratorio.

Los genes de vertebrados de los que se originaron aparentemente los oncogenes de retrovirus recibieron, en un comienzo, la denominación de protooncogenes, para así resaltar su significado evolutivo y esquivar la conclusión de que los genes celulares tenían, por sí mismos, potencial oncogénico. Potencial que nadie les discute hoy. Son oncogenes celulares. Las investigaciones que apoyan dicha designación arrancaron del planteamiento siguiente: si los oncogenes de retrovirus son mera copia de los genes encontrados en las células normales, ¿cómo explicar los devastadores efectos que provocan los genes víricos en las células infectadas? Se presentaron dos modelos de solución. La hipótesis mutacional propone que los oncogenes víricos difieren de sus progenitores celulares en aspectos sutiles, pero muy importantes, resultado de mutaciones introducidas cuando los genes celulares se copiaron en el genoma de los retrovirus. Así, las actividades enzimáticas de pp60v-*src* y pp60c-*src*, aparentemente similares, podrían tener en realidad distintas proteínas diana en la



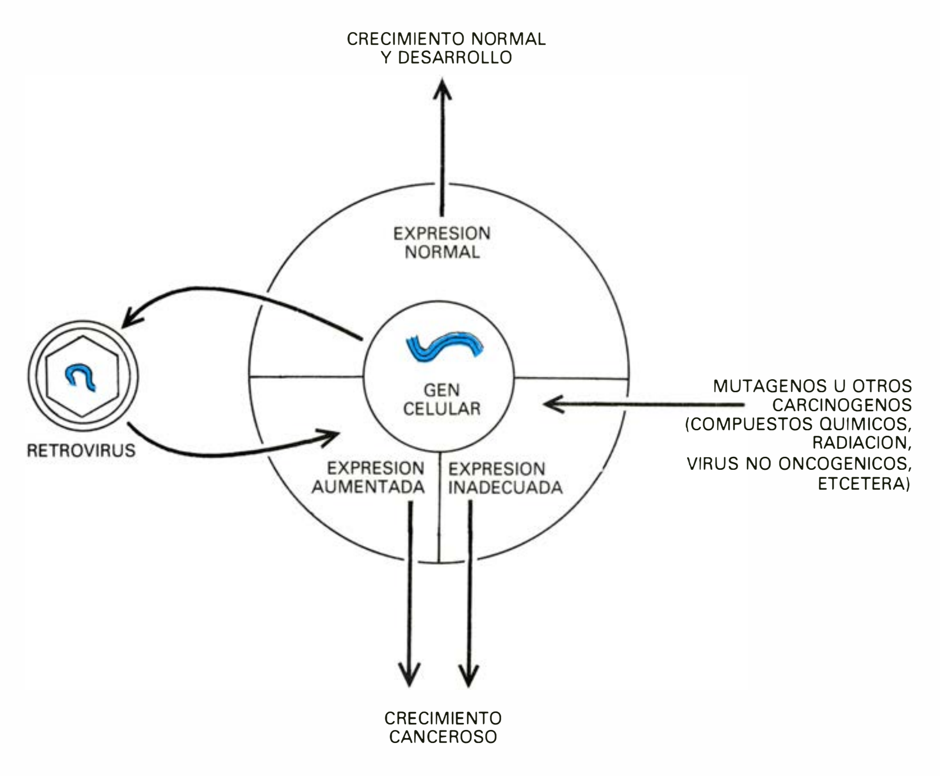
HIPOTESIS DE LA DOSIS. Sostiene que un oncogén celular determina la síntesis, en cantidades adecuadas, de una proteína normal requerida para el crecimiento celular normal (*fila superior*) y que la transformación resulta de la producción excesiva de la proteína normal. En el caso de infección por un retrovirus tumoral (*1*), la superproducción está dirigida por el oncogén vírico bajo control del virus. El oncogén celular, por su parte, tiene también una capacidad potencial de producir tumores, como se ha demostrado con un experimento de ADN recombinante (*2*). Si se fija un "promotor" vírico al oncogén celular y la forma activada del gen se reinserta en células en cultivo, se producen excesivas cantidades del producto del oncogén y se transforma la célula. Un proceso similar puede explicar el crecimiento canceroso inducido por una amplia gama de productos diferentes de retrovirus (*3*). Si un mutágeno, u otro agente cancerígeno, daña el ADN celular de tal forma que aparece un incremento de la actividad del oncogén celular, el producto del oncogén puede elaborarse en cantidades excesivas, torciendo el rumbo de la célula hacia el crecimiento canceroso. Los dibujos del artículo son de Bunji Tagawa.

célula, dando lugar, por tanto, a efectos muy dispares en el comportamiento celular. La hipótesis alternativa, de la dosis, sugiere que los oncogenes de retrovirus actúan por fuerza bruta, sobresaturando las células con un exceso de las proteínas esenciales que desempeñan funciones normales en la célula. Desde este punto de vista, la producción del cáncer por los oncogenes de retrovirus guardaría una relación más estrecha con la cantidad de proteínas víricas sintetizadas que con ninguna de sus propiedades específicas.

Aunque es demasiado pronto para saber cuál de estas dos posibilidades es la correcta, los datos iniciales apoyan la hipótesis de la dosis. En primer lugar, las dosis de proteínas transformantes producidas por retrovirus son, evidentemente, muy elevadas. Las señales que dirigen la actividad de los genes de los retrovirus son realmente poderosas, dando como resultado el que las cantidades de proteína producida por un oncogén vírico sea mucho mayor que la cantidad producida habitualmente por el gen celular correspondiente; es más que probable que la célula quede materialmente inundada por esas proteínas. Las indicaciones más importantes en este sentido derivan de los esfuerzos realizados por someter a prueba una predicción fundamental de la hipótesis de la dosis: si los oncogenes de retrovirus y los oncogenes celulares son idénticos en su función, tal vez existan condiciones concretas en las que los genes celulares, por sí mismos, lleguen a inducir el crecimiento canceroso.

Oncogénesis por genes celulares

El primer ensayo de dicha predicción lo constituyen los importantes experimentos de Hidesaburo Hanafusa y sus colaboradores, de la Universidad Rockefeller. Hanafusa encontró cepas de virus del sarcoma de Rous que habían perdido gran parte del gen *src* (aunque no el gen completo), incapaces de indu-



LA NOCION DE GEN CANCERIGENO, que se apoya en los datos obtenidos de los oncogenes y en otras pruebas provisionales, sugiere una explicación unitaria de varios tipos de carcinogénesis. El elemento fundamental común es un grupo de genes requeridos para el crecimiento y desarrollo normales. Cuando se trasplantan a un genoma de retrovirus (*izquierda*), estos genes se convierten en oncogenes. El cáncer puede aparecer también cuando el gen celular sufre el efecto de algún mutágeno o agente cancerígeno.

cir, por tanto, el sarcoma característico en animales de experimentación. Cuando Hanafusa inyectó los virus en pollos y recuperó luego las partículas víricas elaboradas por las células infectadas, observó con sorpresa que el gen v-*src* de los virus se había reconstituido. Aparentemente, el material genético del gen c-*src* se había recombinado con el genoma vírico mientras el virus se estaba replicando en las aves. El virus portador del gen reconstituido era de nuevo capaz de producir tumores, a pesar de que tres cuartas partes de su oncogén se habían tomado de un gen celular. Hanafusa reprodujo posteriormente este extraordinario ensayo a voluntad, tanto en pollos como en codornices. Sus hallazgos suponían un fuerte apoyo a la idea de que las funciones de c-*src* y v-*src* eran las mismas, aunque la falta de pruebas más directas sobre el potencial tumorogénico de los genes celulares motivó que muchos especialistas en virus tumorales no quedaran convencidos.

Pero ya tenemos tales pruebas. Los grupos de investigación de George F. Vande Woude y Edward M. Scolnick, del Instituto Nacional del Cáncer, utilizaron las técnicas de la ingeniería genética para aislar tres oncogenes celulares (uno de ratón y los otros dos de rata) y mostraron de forma directa que dichos genes podían inducir el crecimiento canceroso de células en cultivo. Esta hazaña se consiguió mediante la unión, a los genes celulares, de un "promotor" vírico, una señal codificada en el ADN que ayuda a regular la expresión de un gen contiguo. De acuerdo con la hipótesis de la dosis, cuando el complejo promotor-*src* se introdujo en las células, algunas de éstas se transformaron como si hubieran recibido un oncogén vírico; la verdad es que lo que habían recibido era un gen celular sometido a órdenes víricas, que le hacían trabajar a un rendimiento mayor de lo usual. Además, las células transformadas por los dos oncogenes celulares de rata producían grandes cantidades de las proteínas codificadas por los genes, lo que volvía a encajar en la hipótesis de la dosis.

¿Por qué el exceso de una proteína normal desencadena semejante catástrofe? La respuesta sólo la tendremos cuando sepamos qué papel desempeñan los oncogenes celulares en los procesos de las células normales. Tal vez los oncogenes celulares formen parte de un delicado equilibrio de controles que regulan el crecimiento y desarrollo de las células normales. La excesiva actividad de uno de esos genes podría desplazar el equilibrio de la regulación hacia un crecimiento desaforado.

Hay pruebas de que las actividades dirigidas por los oncogenes víricos y celulares intervienen en la regulación del crecimiento de las células normales. Como se ha dicho antes, en un principio parecía que la fosforilación de tirosinas por pp60v-*src* podía ser un proceso anómalo cuya extraña naturaleza contribuiría a la respuesta cancerosa debida a *src*; sospecha que hubo que desecharla cuando Stanley Cohen, de la Facultad de Medicina de la Universidad Vanderbilt, observó que la fosforilación de tirosinas desempeñaba un papel en el metabolismo de las células normales. Este investigador había identificado un pequeño "factor de crecimiento epidérmico", cuya fijación a la superficie celular estimulaba la síntesis de ADN y la división celular; y ahora pretendía discernir cómo podía transmitirse la señal desde la superficie de la célula hasta su interior. Cohen demostró primero que la fijación del factor de crecimiento epidérmico a las células provocaba la fosforilación de proteínas. Espoleado por los hallazgos obtenidos con pp60v-*src*, descubrió finalmente que la fosforilación estimulada por el factor de crecimiento epidérmico afectaba de una manera específica a las tirosinas. Otros autores han ido señalando posteriormente que algunas proteínas que se fosforilan en respuesta al factor de crecimiento epidérmico pueden hacerlo por pp60v-*src*. De este modo, un estimulador normal de la división celular (el factor de crecimiento) y otro anormal (pp60v-*src*) interpretaban sobre un mismo teclado. De lo que se deduce que la fosforilación de tirosinas por pp60v-*src* desempeña un papel en la regulación del crecimiento de las células normales.

En busca de una teoría unificada

Los retrovirus no parecen ser una de las causas principales del cáncer humano. Pero sí pueden habernos señalado el camino hacia los mecanismos fundamentales por los que aparece la enfermedad. Se supone generalmente que el cáncer se inicia con lesiones en el ADN, aunque la naturaleza de ese daño esté todavía por aclarar. ¿Cómo puede el mal originar crecimiento canceroso? Los esfuerzos más recientes por responder a esta pregunta de suerte tal que valga para todo tipo de cáncer hablan de la existencia de "genes cancerígenos", o componentes del genoma celular normal cuya actividad se desreprime o refuerza por acción de cancerígenos de distintos tipos, haciéndose responsables del mantenimiento del

comportamiento indisciplinado de las células cancerosas. Según este esquema, los genes cancerígenos no se consideran intrusos extraños, sino genes normales que hubieran enloquecido. El daño producido por un agente cancerígeno externo convierte al amigo en enemigo, al incidir quizá directamente en el gen cancerígeno o afectando a un segundo gen que controla la actividad del gen cancerígeno.

Los genetistas de ámbito clínico toparon, a buen seguro, con los efectos de los genes cancerosos hace años, cuando identificaron por vez primera familias cuyos miembros heredaban una predisposición a contraer algunas formas particulares de cáncer. Hoy, los especialistas en virus tumorales han avanzado en el estudio directo de los genes cancerígenos, en su forma de oncogenes celulares. En su presentación vírica, dichos genes son tumorogénicos. Los resultados de Vande Woude y Scolnick implican que los genes celulares también pueden transformar células. Es fácil imaginar, por consiguiente, que los genes cancerígenos y los oncogenes celulares son una misma cosa. La hipótesis del oncogén ha vuelto a aparecer en escena con los mismos actores, hecha la salvedad de que ahora son genes celulares, no víricos. La hipótesis de la dosis sirve para explicar por qué el incremento en la actividad de un gen normal causa cáncer.

Algunos datos que apoyan esta argumentación se han recogido en el estudio de los retrovirus de pollo que inducen linfomas o tumores letales del sistema inmune. Los virus del linfoma de pollo carecen de oncogenes. ¿Por qué causan tumores entonces? William S. Hayward y Benjamin G. Neel, de la Universidad Rockefeller, y Susan M. Astrin, del Instituto de Investigación del Cáncer de Fox Chase, Pennsylvania, han descubierto que, en tumores inducidos por los virus del linfoma de pollo, el ADN vírico se inserta casi siempre en el ADN celular en las proximidades de un oncogén celular único (no el c-*src*, sino otro descubierto más recientemente que se conoce como c-*myc*). Todo parece indicar que la expresión del oncogén celular se multiplica (amplifica) sensiblemente a raíz de la inserción.

Estos hechos encajan bastante bien dentro del modelo de genes cancerígenos. La inserción del ADN del virus del linfoma en el genoma del huésped es análoga a la mutagénesis u otras formas de daño producidas por agentes carcinogénicos de muy distinta naturaleza. La inserción estimula, según se ve, la

actividad de un gen reconocidamente oncogénico (como v-*myc*) cuando se presenta en un retrovirus de pollo diferente. La actividad estimulada del oncogén celular parece ser responsable, al menos en parte, de la génesis de tumores. Los retrovirus que no poseen oncogenes inducen una amplia diversidad de tumores. Mediante la identificación del sitio donde el genoma vírico se inserta en el ADN celular en alguno de estos tumores, los virólogos podrían descubrir genes cancerígenos que se han manifestado inabordables, hasta ahora, desde otras vías.

La manifestación de los genes cancerígenos (bajo la forma de oncogenes celulares) por parte de los retrovirus debióse al azar. ¿Habrán de conformarse los investigadores con esperar pacientemente a que los retrovirus les apunten nuevos oncogenes presentes en la célula? No parece. Robert A. Weinberg, del MIT, y Geoffrey Cooper, de la Facultad de Medicina de Harvard, han ampliado la búsqueda de genes cancerígenos más allá del ámbito de la virología de los tumores. Han demostrado que fragmentos de ADN del tamaño de un gen, aislados a partir de algunos tumores (que no habían sido inducidos por virus), son capaces de transmitir la propiedad del crecimiento canceroso cuando se introducen en células normales en cultivo.

Weinberg y Cooper han descubierto una manera de transferir genes cancerígenos activos de una célula a otra. Poseen pruebas de que genes cancerígenos distintos se muestran activos en diferentes tipos de tumores y, por ello, parece probable que su estudio incremente notablemente el repertorio de genes cancerígenos, de los que habrán de ocuparse los investigadores. Ninguno de los genes cancerígenos encontrados por Weinberg y Cooper hasta hoy es idéntico a ningún oncogén conocido. Entra dentro de lo posible que no haya más que una sola gran familia de oncogenes celulares. De resultar ello cierto, el estudio de los retrovirus y los procedimientos desarrollados por Weinberg y Cooper podrían en algún momento empezar a configurar los elementos que son comunes dentro de ese conjunto único.

Una vía final común

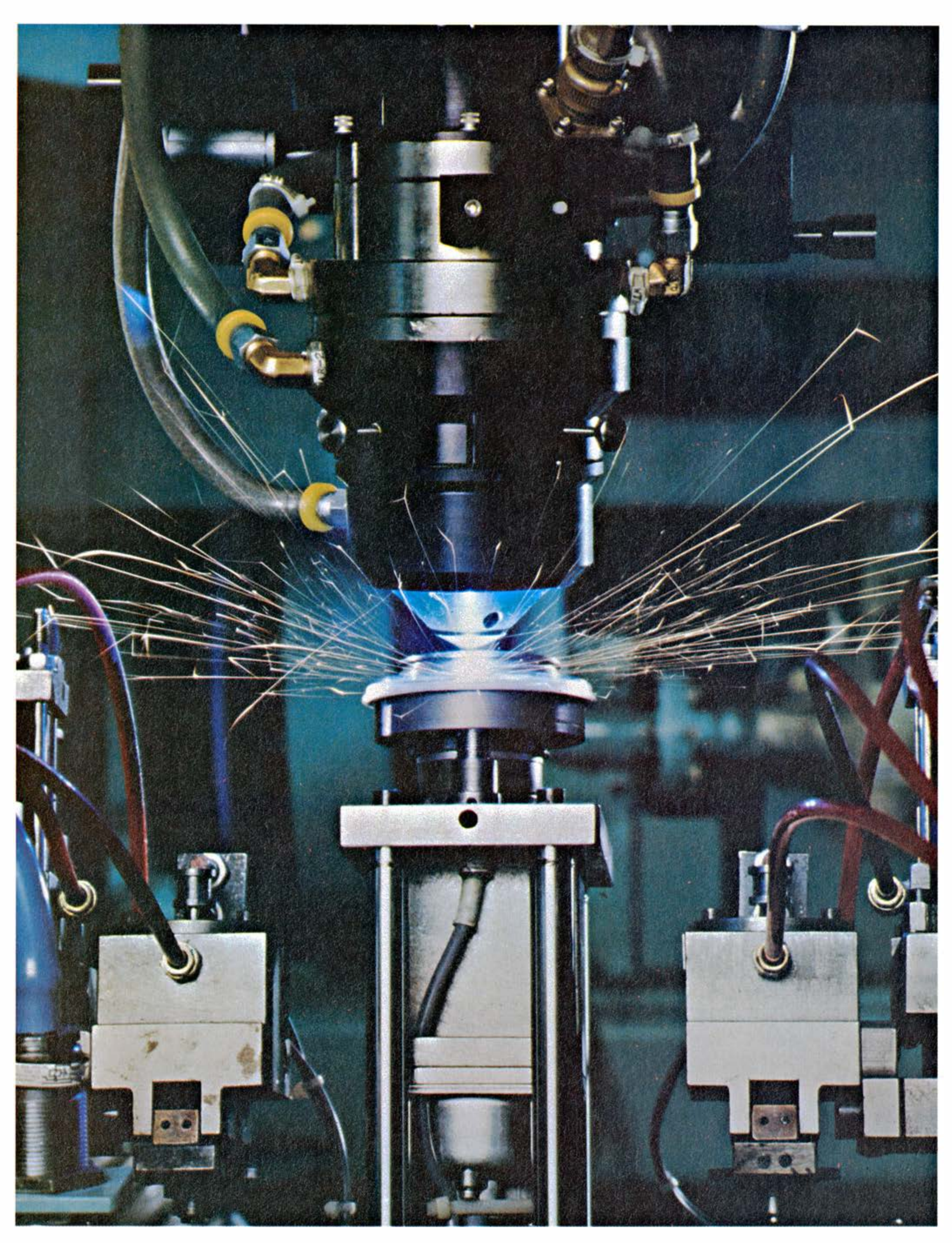
Es posible que las células normales contengan las semillas de su propia destrucción en forma de genes cancerígenos. Las actividades de dichos genes quizá representen la vía final común a través de la cual operan muchos agentes cancerígenos. Cabe presumir que los genes cancerígenos no se reduzcan a ser unos huéspedes indeseables, sino que sean componentes imprescindibles del aparato genético de la célula, a la que sólo perjudicarían cuando agentes cancerígenos externos modificaran su estructura o función. Algunos de esos genes han aparecido en retrovirus, donde se hallan a nuestro alcance para su identificación y manipulación.

Lo que sabemos ya de los oncogenes viene a ser como un breve asomar la cabeza tras la cortina que ha velado durante largo tiempo los mecanismos del cáncer. En cierto sentido, esta primera ojeada ha resultado decepcionante: los mecanismos químicos que parecen llevar a la célula cancerosa por el camino erróneo no difieren sustancialmente de los mecanismos funcionales de la célula normal. Con ello queremos decir que el diseño de estrategias terapéuticas se nos continuará resistiendo con la misma tenacidad que hasta hoy. De nada servirá inventar nuevos medios que impidan el funcionamiento de las actividades responsables del crecimiento canceroso si esas actividades las necesita la célula normal para sobrevivir.

Aunque la serie de oncogenes sea limitada, ofrece varias enseñanzas para los interesados en el campo de la investigación del cáncer. El estudio de virus alejados de la preocupación de los humanos, en lo concerniente a su patogenicidad, ha reportado potentes instrumentos para el desentrañamiento de la enfermedad en el hombre. La virología de tumores ha persistido a pesar de no lograr aportar un elenco de agentes víricos que provoquen la aparición del cáncer en humanos. La cuestión no estriba ya en que los virus produzcan tumores entre nosotros (aunque puedan producirlos en algunas ocasiones), sino en qué enseñanzas podemos sacar de la virología de tumores que nos sirvan para conocer los mecanismos que provocan la aparición del cáncer en humanos.

ONCOGEN	ESPECIE DE ORIGEN	TIPO DE TUMOR	PROTO-ONCOGEN EN ADN DE VERTEBRADOS	PRODUCTO DEL ONCOGEN		
				PROTEINA QUINASA	FOSFORILA TIROSINA	LOCALIZADO EN LA MEMBRANA PLASMATICA
v-*src*	POLLO	SARCOMA	SI	SI	SI	SI
v-*fps*	POLLO	SARCOMA	SI	SI	SI	SI
v-*yes*	POLLO	SARCOMA	SI	SI	SI	?
v-*ros*	POLLO	SARCOMA	SI	SI	SI	?
v-*myc*	POLLO	CARCINOMA, SARCOMA, LEUCEMIA	SI	?	?	?
v-*erb*	POLLO	LEUCEMIA, SARCOMA	SI	?	?	?
v-*myb*	POLLO	LEUCEMIA	SI	?	?	?
v-*rel*	PAVO	LINFOMA	SI	?	?	?
v-*mos*	RATON	SARCOMA	SI	?	?	?
v-*bas*	RATON	SARCOMA	SI	?	?	?
v-*abl*	RATON	LEUCEMIA	SI	SI	SI	SI
v-*ras*	RATA	SARCOMA, LEUCEMIA	SI	SI	?	SI
v-*fes*	GATO	SARCOMA	SI	SI	SI	?
v-*fms*	GATO	SARCOMA	SI	SI	?	?
v-*sis*	MONO	SARCOMA	SI	?	?	?

RELACION DE ONCOGENES de retrovirus que proporcionan modelos experimentales de la mayoría de los cánceres de humanos. Junto a sus nombres se relacionan también las especies de origen y los tipos de tumores que inducen. Cada uno de estos 15 oncogenes está relacionado con un proto-oncogén encontrado en el ADN de vertebrados. El producto de ocho de estos genes, al menos, es una proteína-quinasa. Se ha demostrado que seis de las ocho quinasas fosforilan, específicamente, el aminoácido tirosina; al menos cuatro de las quinasas se fijan a la membrana plasmática de las células cancerosas.



SOLDADURA POR LASER de un anillo de sincronización a un engranaje de la transmisión de un automóvil, realizada en la planta Mirafiori de la Compañía Fiat en Turín, Italia. El haz láser, invisible, se envía a través de la tobera de forma cónica sita en el extremo del cabezal de la soldadura, por encima mismo de las chispas. Estas las causa la erosión explosiva de las impurezas superficiales durante una primera pasada (punteo), que se realiza girando la pieza una vez bajo el haz a una velocidad de 75 revoluciones por minuto. A lo largo del giro siguiente (a 25 rpm), inmediato, no saltan apenas chispas. En este segundo giro se produce la soldadura profunda. El haz lo genera un láser de dióxido de carbono de 2,5 kilowatt, fabricado por Spectra-Physics.

Aplicaciones del láser en la industria

Las herramientas láser han encontrado su lugar en los procesos de taladrado, corte, soldadura, tratamiento térmico y obtención de aleaciones en la industria. Permiten acercarnos con una nueva óptica al producto y su fabricación

Aldo V. La Rocca

Una de las características principales de la radiación láser es su intensidad. La palabra "láser" es una acrónimo formado con las iniciales de la definición inglesa a que ese concepto remite: amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación. La amplificación genera una cascada de fotones (cuantos de radiación electromagnética en un haz estrecho). Desde los días de su invención, en la década de los 50, se pensó ya en el aprovechamiento de los intensos haces de láser para aportar grandes cantidades de energía a los materiales en procesos industriales. La idea se ha convertido en una técnica desarrollada. A lo largo de los últimos diez años, los láseres de alta potencia se han venido aplicando a múltiples procesos de fabricación y conformado: soldadura de componentes de automóviles, sistemas electrónicos e instrumentos utilizados en medicina y cirugía; tratamiento térmico de partes de automóviles y aviones para mejorar sus propiedades de superficie; corte de chapas de metal en la industria del estampado y matricería, y taladrado de pequeños orificios de refrigeración (de 0,175 a 1,25 milímetros en piezas de aviones). En todas esas operaciones, los sistemas láser han mejorado el rendimiento de las líneas de producción y han reducido los costes. Si paramos la atención en las aplicaciones actuales y su nivel de desarrollo, no resulta arriesgado afirmar que en la década venidera la tecnología láser extenderá su radio de acción a otros muchos procesos industriales.

¿Qué misión cumple el láser en la fabricación? Sirve, sobre todo, como herramienta dotada para aplicar un flujo de energía sumamente elevado a la superficie de la pieza a trabajar. En este sentido, aventaja con distancia a otras fuentes de energía convencionales: llamas, antorchas de sopletes arcos eléctricos y chorros de plasma. Podemos concretar esa ganancia: se obtienen productos de gran calidad (mejores características y menor número de piezas rechazadas o que precisen reparación), se reducen medios para materiales y servicios, se consigue una elevada productividad (mengua el espacio necesario en planta y bajan los costes de amortización) y se alcanza un mejor ambiente de trabajo, sin olvidar la flexibilidad y versatilidad del láser y de los sistemas de producción que se fundan en él.

Se está generalizando el uso en el lenguaje de distinguir entre dos tipos de láseres de alta potencia: los blandos y los duros. La demarcación depende, sobre todo, de la potencia. Los láseres blandos trabajan en la gama que cubre de unas decenas de watt hasta unos pocos centenares. Se emplean en corte y taladrado de substratos cerámicos de la industria electrónica, taladrado de rubíes en relojería y corte de metales, tejidos, plásticos y madera en otros muchos sectores. Hay láseres que son instrumentos compactos de estado sólido: láseres de rubí (con una longitud de onda de 0,69 micrometros), de cristal dopado con neodimio y láseres de granate de ytrio aluminio dopado con neodimio (estos dos últimos con una longitud de onda de 1,06 micrometros en el infrarojo). Longitudes de onda que se ajustan bien a la mayoría de los metales, posibilitando su aplicación en soldaduras, taladrado, corte y tratamiento térmico. Los láseres de rubí y de neodimio-cristal suelen usarse de forma pulsada, mediante generación de una serie rápida de pulsos de intensa energía sobre la superficie de la pieza. Los láseres de granate de ytrio aluminio dopado con neodimio trabajan bien en la forma de onda continua (haz estacionario) o en la forma de pulsos, generando varios miles de éstos por segundo.

El tipo blando comprende también algunos láseres de gas (argón y dióxido de carbono) que suelen operar en forma de onda continua. El haz emitido por un láser de gas tiene una colimación casi total, lo que significa que presenta escasa divergencia, en contraste con la que caracteriza, por ejemplo, al haz luminoso de un flash. El haz puede concentrarse, pues, en un punto (cuyo tamaño varía entre unos cuantos micrometros y una fracción de milímetro) y suministrarle una energía de gran intensidad. Se trata de peculiaridades importantes, de especial interés en la soldadura por el proceso de gran penetración, sobre el que habremos de volver. Los láseres de gas muestran, asimismo, un notable rendimiento, que para el caso del dióxido de carbono, alcanza, en el haz emitido, hasta el 15 por ciento de la potencia consumida.

¿Qué gama de potencia define a los láseres duros? Operan éstos en el intervalo que va desde pocos kilowatt hasta varias decenas de ellos. De momento, sólo los equipos experimentales y de laboratorio superan los 20 kilowatt. En las industrias se emplean láseres duros en procesos pesados: soldadura de oleoductos y de partes de automóviles y tratamiento térmico de superficies de cigüeñales y paneles de cilindros de grandes motores diesel. La aplicación endurece la superficie, incrementando así la resistencia al desgaste. La mayoría de los láseres duros son de dióxido de carbono que operan en el modo continuo.

El cuantioso flujo de energía electromagnética aplicada a la superficie por el láser se absorbe en una capa externa de unos 10 nanómetros (0,000001 milímetros) de espesor. Se concentra

allí, en esa fina capa, una fuente de calor de altísima intensidad. En favor del láser opera que la energía calorífica se mantiene y realiza su función en la zona donde hay que trabajar. Por cuya razón se consigue un elevado rendimiento energético, cifrado en 10 a 1000 veces superior al de los sistemas convencionales que calientan volúmenes de pieza a trabajar mucho mayores en comparación. Los sistemas láser, resumiremos, aceleran el ritmo de proceso en una proporción notable y aportan a la fabricación propiedades únicas.

Otra cualidad del láser es la de no dañar el resto de la pieza: aporta el calor en un tiempo más breve que cualquier fuente convencional, merced a la elevada densidad de potencia del haz, y, por tanto, el calor no tiene tiempo de transmitirse hacia el interior de la pieza en cuestión. Las fuentes de calor convencionales calientan ésta más allá de la zona necesaria, lo que redunda en una distorsión, agrietamiento y tensión inducidos que pueden alterar la pieza hasta el punto de hacer obligada su reparación o exponerse a su funcionamiento defectuoso. Las implicaciones económicas son obvias en piezas costosas semielaboradas: engranajes cuyos dientes deben endurecerse, álabes de turbina donde deben taladrarse orificios de refrigeración y bloques de motor cuyas paredes de los cilindros tienen que endurecerse en el interior.

¿De dónde nacen todas esas ventajas? De la elevadísima densidad de potencia que posee el haz láser. Si nos fijáramos en otras posibilidades suyas veríamos cómo lo convierten en una herramienta de suma flexibilidad y nos aclararían por qué cabe emplearlo, con éxito asegurado, en misiones de suministro energético del que podrían ocuparse fuentes convencionales. Al carecer de masa, podemos fácilmente desplazarlo y controlarlo con breves intervalos de respuesta. Se acopla sin dificultad a procesos automáticos. Actúa a distancia, salvando o reduciendo los problemas que plantea la interferencia mecánica. Por la misma razón, no genera respuestas mecánicas, de suerte que la pieza ni vibra ni necesita que se la sujete. Por último, la tecnología láser actúa con suma pulcritud y rapidez compatible con los puestos de trabajo en las líneas de fabricación. A modo de compendio de lo dicho: la tecnología láser incide en la logística y conjunción del sistema de producción industrial.

Las distintas ventajas se irán plasmando a lo largo de la exposición que hagamos de la aplicación del láser a usos específicos en el proceso de fabricación. Me ocuparé de su gradual introducción en la industria, comenzando con el taladrado y escariado y siguiendo con el corte, soldadura y tratamiento térmico.

En el taladrado y escariado, el láser cumple la misión de eliminar material. Sale caro, desde el punto de vista energético, taladrar con láser; en efecto, hay que fundir y luego vaporizar el material. (Eliminarlo en su forma líquida resulta difícil cuando la profundidad de taladro supera el doble del diámetro.) Para la mayoría de los metales la vaporización consume diez veces más energía que la fusión.

Añádase a ello que el vapor caliente, que el haz láser sobrecalienta con suma rapidez, muestra una altísima sensibilidad a la excitación e ionización; esta última consume, como mínimo, 100 veces más energía que la fusión en la mayoría de los metales. El vapor ionizado se combina con los gases circundantes para formar un penacho de plasma: un gas ionizado. El penacho de plasma absorbe, refleja y dispersa la radiación láser, hasta el punto de llegar a impedirle alcanzar la pieza. Ese fenómeno recibe el nombre de apantallamiento ("blanketing"). Se controla ello mediante sustitución del gas ambiente por un gas inerte, así argón o helio o una mezcla de los dos. Son más transparentes a la radiación láser y más reacios a excitarse e ionizarse.

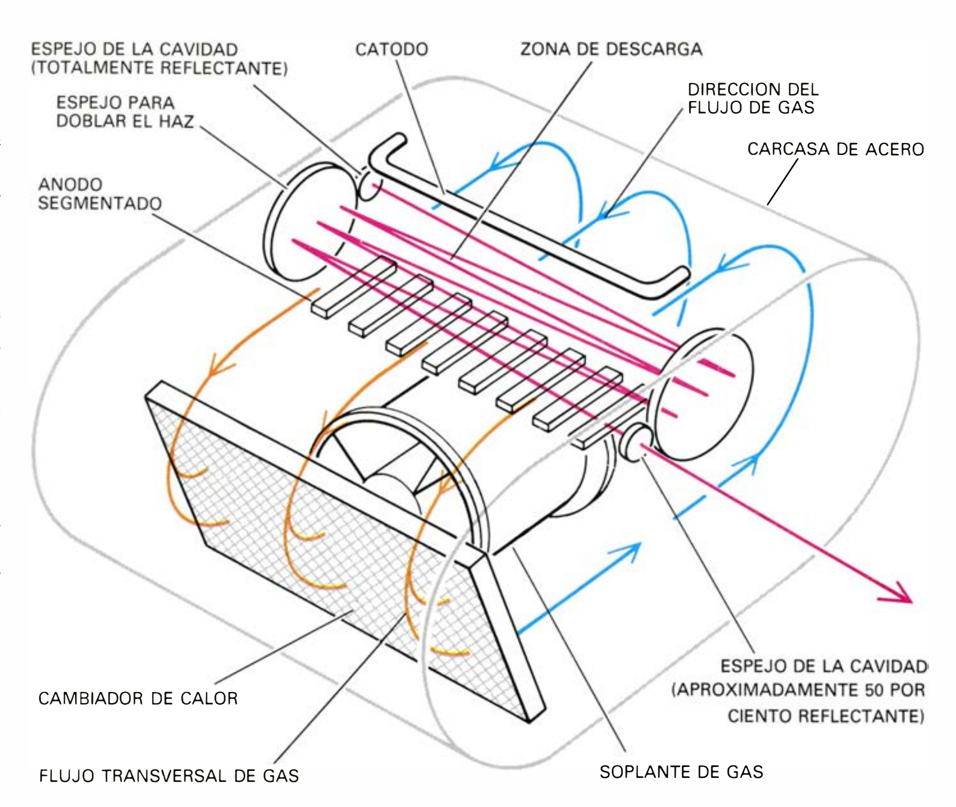
Se ha observado en el taladrado que, al trabajar con mayores densidades de energía, suministrables por láseres pulsados, puede sacarse partido del plasma y de los fenómenos de dinámica de fluidos asociados a la formación del penacho. Lo que permite establecer un proceso análogo al de una combustión soportada por láser y, aumentando la densidad del haz, llegar a una detonación soportada por láser. Las presiones y ondas de choque del plasma al salir del orificio a gran velocidad (supersónica en una detonación) se muestran muy eficaces a la hora de eliminar el fluido y la escoria, óxidos y nitruros sólidos. De ahí que se recurra con frecuencia al láser de estado sólido en el taladrado, pues en esa clase de láseres los impulsos pueden controlarse mejor que con los de gas.

Con todo esto sobre el tapete hay que concluir que el taladrado por láser constituye un proceso caro. Se entiende, pues, que sólo se justifica en la per-

REPRESENTACION ESQUEMATICA DE UN LASER INDUSTRIAL que desarrolla 1200 watt de radiación continua infrarroja. Se trata de un láser por transporte de gas fabricado por Spectra-Physics. Una mezcla de dióxido de carbono, nitrógeno y helio se lleva a un elevado nivel energético (un prerrequisito para el funcionamiento del láser) por medio de una descarga eléctrica entre el cátodo y el ánodo. Se amplifica el haz de láser en siete pasadas entre los espejos del sistema óptico. Aquí, el gas se calienta, y así se traslada hacia las proximidades del cambiador de calor, donde se enfría. El gas se transporta a elevada velocidad en circuito cerrado, donde es excitado, contribuye al haz de láser y se enfría.

foración industrial de agujeros muy pequeños en materiales que reúnen las características siguientes: difíciles de trabajar por medios mecánicos porque superan la capacidad de la herramienta, demasiado duros o abrasivos o, por último, tan blandos que los orificios no puedan realizarse con la precisión requerida. En esas circunstancias las ventajas del láser no necesitan ponderación, y la verdad es que han barrido los procedimientos tradicionales.

El mayor éxito se lo ha apuntado el taladrado de rubíes en relojería. También se recurre al láser en el taladrado de diamantes utilizados como hileras en el trefilado de alambre. En la industria electrónica, taladra y corta los substratos cerámicos de circuitos integrados y arma circuitos y componentes electrónicos. La industria aerospacial emplea el láser para taladrar orificios en piezas construidas de material de extrema dureza: álabes de turbinas y revestimientos de cámaras de combustión. Otras aplicaciones son la apertura de orificios en las tetillas de los biberones, tubos de goma y polietileno y válvulas de plástico de aerosoles.



PERSPECTIVA DE UN CABEZAL láser de un sistema por transporte gaseoso de 1200 watt, donde se muestra el ciclo del gas y el plegado del haz del láser. Al emerger del espejo de salida, el haz es dirigido al cabezal de trabajo de una herramienta para soldadura, corte, taladrado o tratamiento térmico.

El factor común que comparten todos esos usos es la pequeñez del agujero. Comparado, pues, con los demás costes de producción, el coste energético del taladrado por láser resulta bajo. La inversión inicial del equipo, cara, se amortiza rápidamente por su alta productividad y porque elimina la necesidad de otras herramientas costosas.

El taladrado por láser sigue manteniendo un coste prohibitivo para las industrias metalúrgicas pesadas, debido a la gran cantidad de material a desechar. Pero las herramientas láser habrán de ocupar un puesto en el taladrado final y escariado de agujeros ciegos, que no traspasan el material. En éstos suelen quedar virutas y rebabas pegadas a la pared después del taladrado mecánico. El láser podrá eliminarlas y ocuparse del taladrado final si la eliminación mecánica se hace difícil, por lo duro del medio o porque la herramienta pueda dañar el acabado de las paredes. Cilindros, cigüeñales e inyectores de combustible constituyen presumibles candidatos de la acción del láser.

El corte con una herramienta láser requiere menos energía que la operación de taladrado, por unidad de volumen de material desechado, ya que todo lo que se precisa es llevar el material al estado de fusión. Se elimina luego el líquido por un chorro de gas de cobertura. El gas puede ser oxígeno o nitrógeno, si el efecto oxidante o nitrurante (que pueden tornar la superficie del material frágil o más dura de lo deseado, disminuyendo su resistencia a la corrosión) no actúa de una forma condicionante. El oxígeno aumenta, en varias veces, la velocidad de corte por su reacción exotérmica con la mayoría de los metales a elevada temperatura. De este modo pueden cortarse los aceros altos en carbono y las aleaciones de titanio, ya que los productos de la reacción son sólidos y los elimina fácilmente el chorro de gas.

El haz láser aplicado al proceso de corte puede automatizarse en su totalidad mediante control numérico computerizado. Y así, seguir pautas muy complejas, comenzando, según se exija, por el borde o por el interior de la chapa de material. Cortes de ese tipo se les hace muy cuesta arriba, si no imposibles, a las herramientas mecánicas, como los discos abrasivos de diamante que suelen ser los únicos capaces de atacar los materiales duros. Parece acertado, pues, pensar en los láseres.

Guiada por un programa automatizado, la herramienta láser de corte puede mejorar grandemente la precisión, repetibilidad, flexibilidad y productividad. Y el efecto combinado de esos avances en los esquemas de producción elevará el rendimiento de la fabricación de ocho a 20 veces más, según afirman los cálculos realizados al respecto. Los sistemas láser suman más ventajas: ausencia de vibración, ruido y polvo, reducción de humos y hacer innecesaria la compra, almacenamiento y mantenimiento de cabezales de corte, varios y con frecuencia caros.

Tomadas en conjunto, estas razones abonan la viabilidad del coste de las herramientas láser, a pesar de la cara inversión inicial, cifrada en dos a cinco veces lo que valen los sistemas de corte convencionales. En un año, si es que llega, se amortiza el coste de las herramientas láser, lo que explica su rápida generalización a gran número de aplicaciones de corte. Se calcula que cada año se instalan más de 100 sistemas de corte láser en todo el mundo, que trabajan en un rango de potencia entre los 400 y 2000 watt.

El éxito mayor se ha registrado en las industrias que manipulan chapas de metal recubierto, materiales de fibras orgánicas (madera, cuero, aglomerados y textiles), plásticos y materiales plásticos reforzados con alambres, cerámica, cuarzo, vidrio, materiales compuestos y materiales aerospaciales exóticos. Incluso en materiales de fácil corte el láser ofrece ventajas inesperadas. Un ejemplo de esto último lo tenemos en el corte de tejidos para confección.

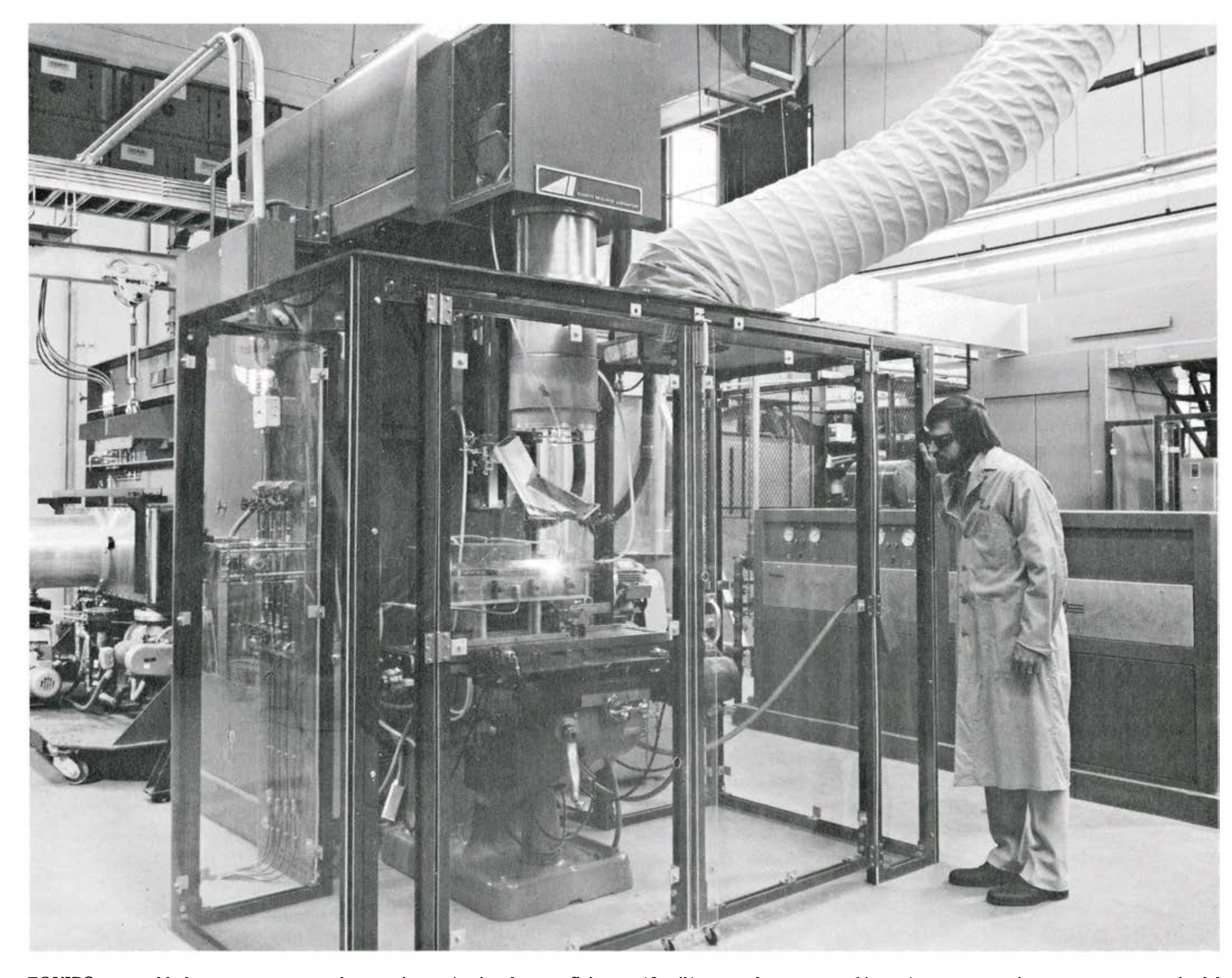
Con el tejido, en efecto, se hace necesario muchas veces cortar patrones complicados. Conviene, además, reali-

zar un corte preciso con bordes bien sellados, de suerte que pueda prescindirse del bordeado y la costura. En esas tareas han cosechado un gran éxito los sistemas láser completamente automatizados que operan por control numérico. Se corta el tejido capa a capa, eliminando la tendencia que tienen las telas apiladas a mantenerse unidas en la zona de corte. Basta un láser de escasa potencia (de 200 o 400 watt) para que la alta velocidad de proceso conseguida permita cortar tejidos para más de 40 trajes por hora. Un sistema de este tipo, fabricado por Culham Laboratory en Inglaterra, dispone de un láser de 400 watt cuyo haz lo guían espejos móviles. El haz corta una bobina de tela de dos metros de anchura a una velocidad de alimentación de 80 metros por minuto. La memoria del ordenador almacena toda la información necesaria respecto a formas y tamaños y hasta las variaciones que puedan suponer los encargos especiales. Hay en marcha unos 20 sistemas similares en los Estados Unidos y Gran Bretaña.

En la soldadura, los equipos láser pueden operar de dos formas diferentes: por conducción y por penetración en profundidad. En la soldadura por conducción, la fuente de calor se mantiene en la superficie de la pieza a trabajar. La superficie ha de permanecer por debajo de la temperatura de vaporización para evitar pérdidas de material que debiliten la soldadura. Las soldaduras obtenidas guardan la relación de 1:1,5, que quiere decir lo siguiente: la profundidad de la soldadura sólo puede ser vez y media el valor de la anchura. La soldadura por conducción se emplea en la unión de láminas pequeñas o chapas. No alcanza un rendimiento sobresaliente (del 8 al 15 por ciento) y deja zonas bastante amplias que hayan sido alteradas por el calor.

Estos inconvenientes se superan con la soldadura de penetración en profundidad; de los dos procesos, el más importante. La penetración en profundidad se consigue desplazando la fuente de calor (la zona de mayor temperatura) por debajo de la superficie del material. El rendimiento del proceso aumenta rápidamente hasta valores por encima del 80 por ciento, incluido el consumo de energía en la vaporización, excitación, ionización y apantallamiento del penacho.

La explicación hay que buscarla en los efectos beneficiosos resultantes de la interconexión de múltiples fenómenos complejos que se desarrollan cuando la fuente térmica penetra hondamente en la pieza y crea un núcleo de vapor recalentado, rodeado a su vez de material fundido sobrecalentado. El núcleo ocupa una pequeña zona, que en una soldadura de penetración completa se extiende por todo el espesor

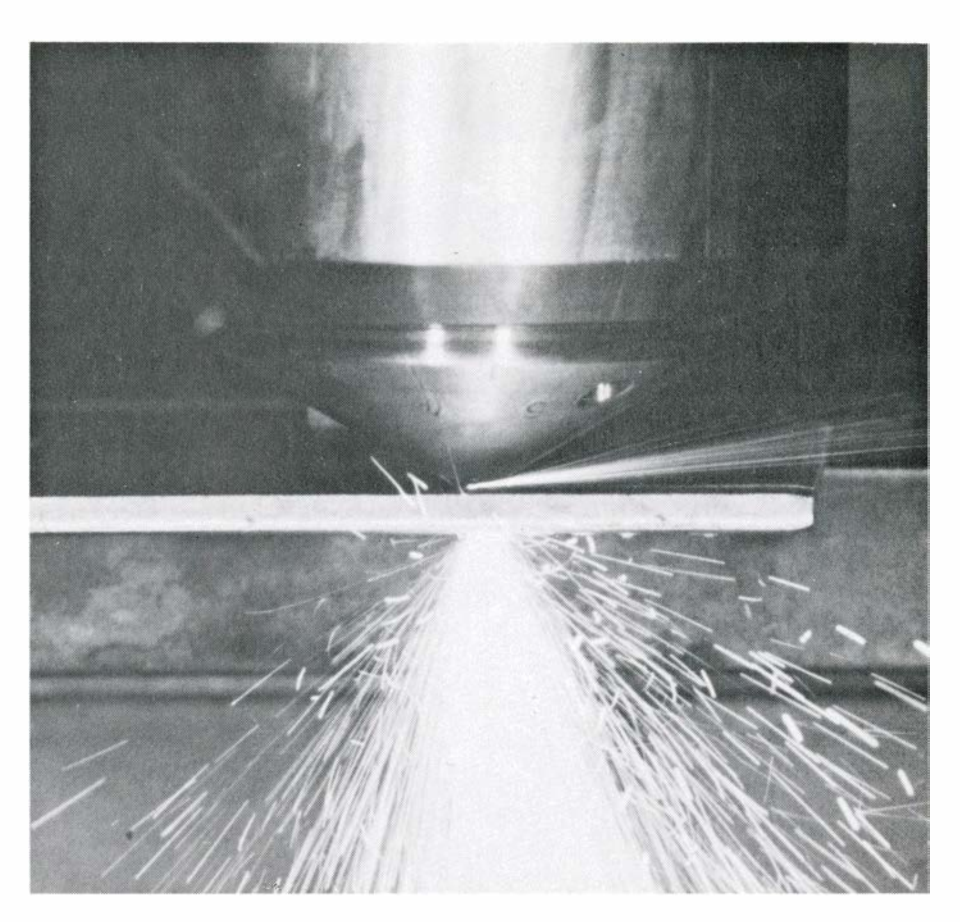


EQUIPO para soldadura y corte y para el tratamiento térmico de superficies metálicas, que posee un láser de la primera generación, de 15 kilowatt. El puesto de trabajo de la derecha es para tratamiento superficial; el situado en primer término, para soldadura y corte. Se está soldando acero inoxidable de 13 milímetros de espesor a 64 centímetros por minuto con una potencia del haz de 7,5 kilowatt. El láser emite un haz infrarrojo continuo, dirigido hasta la pieza a través de un telescopio. Una bancada de fresadora estándar mueve la pieza. Podemos regular la potencia del haz entre 1,5 y 15 kilowatt.

del material. En un haz de elevada intensidad bien focalizado, el núcleo se establece en milisegundos. Y se le puede mantener mientras se le obliga a moverse conforme se va soldando.

El material fundido sale hasta la superficie exterior por la presión del vapor recalentado. Se mantiene allí por un efecto combinado de gravedad, viscosidad y tensión superficial, lo que favorece la formación del baño superficial, baño que mejora las propiedades mecánicas de la soldadura. Vale la pena destacar, además, que, debido a los gradientes de temperatura y presión, el material fluido del núcleo está sometido a una violenta agitación. Esos movimientos inducen una transferencia de calor por el transporte conjunto de material y de calor latente de los cambios de fase (tal como el cambio de fase gaseosa a fase líquida). El núcleo actúa, pues, como un tubo conductor y cambiador de calor, aunque de un modo más eficaz que cualquiera de ellos; les saca partido a los calores latentes de excitación e ionización, que son de unos órdenes de magnitud superiores a los de cambio de fase que intervienen en los cambiadores de calor.

La gran capacidad de transporte de calor existente en el núcleo implica que el material que le rodea actúe de aislante e inhiba el flujo, no deseado, de calor hacia el resto de la pieza. Este fenómeno explica el gran rendimiento de la soldadura láser de penetración profunda, que se pone de manifiesto a través de las elevadas relaciones de profundidad a anchura (entre 5:1 y 12:1) y la extensión, limitada, de la zona en torno a la soldadura afectada por el calor.



CORTE POR LASER realizado por el Instituto de Investigación y Tecnología Mecánica de Italia. Una chapa de acero inoxidable de cinco milímetros de espesor se alimenta de izquierda a derecha a una velocidad de 1,2 metros por minuto, bajo el cabezal de corte fijo. El haz de láser infrarrojo, invisible, atraviesa una boquilla concéntrica que también suministra oxígeno; éste reacciona con el metal calentado por el láser e induce una combustión que acelera el corte. Las chispas del primer plano son causadas por la expulsión de partículas líquidas o sólidas desde el corte. Esta operación de corte se realiza a 2,5 kilowatt con un haz generado por un láser de Avco Everett, que es programable entre 1,5 y 15 kilowatt.

Desde un punto de vista metalográfico, una soldadura de penetración en profundidad realizada por un haz láser presenta una buena estructura cristalina con pocas impurezas. En consecuencia, las propiedades mecánicas, así dureza, resistencia a la rotura y al choque, se equiparan, cuando no superan, a las del metal base. El efecto de afino y purificación de la soldadura láser se ha dejado sentir en el acero empleado en ingeniería naval, acero para oleoductos árticos, aceros al niquel y los nuevos aceros HSLA (aceros de alto límite elástico y baja aleación).

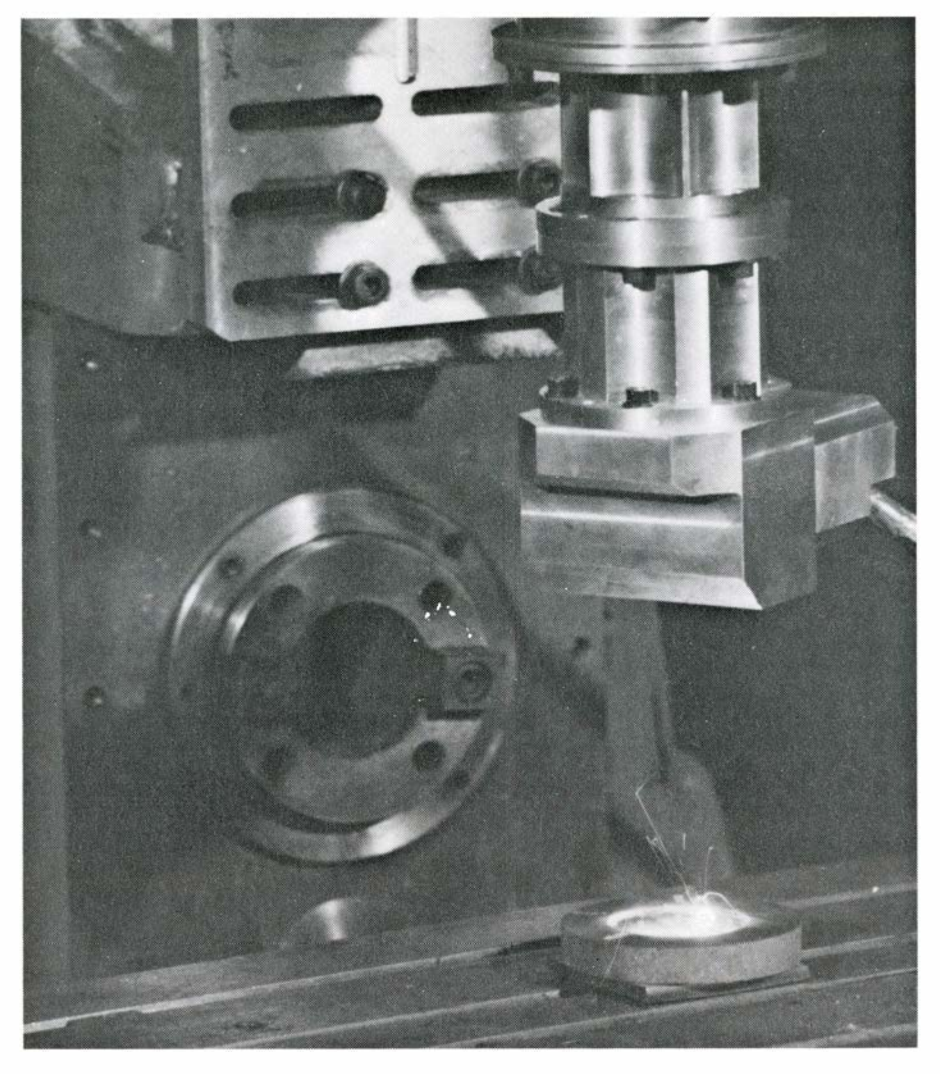
En sus comienzos, la soldadura láser del aluminio y sus aleaciones encontró algunas dificultades, debido a que el baño fundido mostraba una baja tensión superficial y una viscosidad asimismo baja. Resultaba que con chapas de más de tres milímetros de espesor, el baño fundido no se mantenía en su sitio y la zona fundida era excesivamente fina y porosa. Un programa de desarrollo patrocinado por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) venció los problemas de soldadura de chapas de aleaciones de titanio y de aluminio calentándolas antes de soldar. Se ha llegado a soldar ya con éxito chapas de hasta 13 milímetros de espesor.

La soldadura con láser presenta muchas ventajas prácticas. No se precisan varillas fundentes ("fluxes") ni materiales protectores. Se pueden soldar materiales diferentes. Los alabeos, tensiones internas y grietas se reducen a un mínimo, lo que conviene poner de relieve si los materiales a soldar son dispares o frágiles. No se requiere el contacto físico con las partes a soldar; basta que las pueda alcanzar el haz. El poder guiarlo por espejos, nos faculta para hacerlo incidir en el mismo interior de una pieza hueca. Las soldaduras pueden realizarse, pues, en zonas de difícil acceso, sin necesidad de aplicar tensiones mecánicas a las partes. En este sentido, hay ya sistemas láser con espejos que realizan soldaduras de penetración profunda en oleoductos.

La flexibilidad en el uso de los haces láser y la facilidad de su manejo, posicionado y control facilitan enormemente la operación automática. Ello permite diseñar y construir sistemas de altísimo rendimiento que manipulen estructuras y formas complicadas. En este ámbito de aplicación la tecnología láser reduce o elimina la necesidad de personas de gran habilidad, simplificando el hasta ahora mágico arte de realizar soldaduras difíciles.

Lo que sí exige la soldadura láser es mayor precisión en el posicionado de las piezas. Si la distancia que media entre dos piezas a soldar rebasa el 25 por ciento del espesor de dichas piezas y no se añade material de aportación, los bordes del material pueden descolgarse y la operación terminar con una soldadura fina o porosa. Pero se ha visto que la necesidad de un posicionado preciso no constituye ningún problema insoluble.

Campo de aplicación de la soldadura láser es el sector industrial de la electricidad y la electrónica: para realizar juntas de materiales diferentes,



ASIENTO DE VALVULA, aleado por láser en el Centro de Investigación Fiat en Orbassano, Italia. El intenso calor de un haz láser emitido en un área reducida permite alear la superficie de una pieza, tras su conformación. Este asiento de válvula se fabrica por fundición de hierro; se está aleando con polvo de elementos elegidos como sustitutos de Stellite, aleación que contiene el 50 por ciento de cobalto, material estratégico muy caro. Se está ensayando la nueva aleación para compararla con la Stellite en lo concerniente a la resistencia al desgaste en un ambiente caliente y químicamente activo de gases de combustión en la región en donde la cabeza de válvula hace contacto reiteradamente. En este tratamiento térmico, el haz láser funde y agita los elementos de aleación, determinando su pronta difusión por el hierro.



PRIMER PLANO del asiento de válvula, del que nos hablaba la ilustración precedente. Vemos la zona en donde el haz láser, que se mueve automáticamente alrededor de la superficie a alear, aporta su intenso calor. El material sometido a aleación con el hierro está en forma de polvo. Al no establecerse contacto mecánico entre el haz láser y la pieza, tampoco hay que sujetar con mordazas el asiento de válvula.

chapas de materiales recubiertos y de motores eléctricos y en la sujeción de electrodos a baterías y cables de terminales. Como siempre, la soldadura láser es superior a la soldadura tradicional, al cumplir su cometido con un menor aporte de calor y, por tanto, la zona afectada térmicamente es menor. Con materiales dispares, el afino metalúrgico producido por la soldadura láser impide la formación de juntas frágiles. En chapas recubiertas, una herramienta del equipo láser elimina el recubrimiento de la zona a soldar mientras se está soldando; los métodos convencionales exigen que ello se realice en pasos distintos. En el caso particular de la soldadura de los electrodos a las baterías y de los cables a los terminales, la zona afectada por el calor no daña otras partes de las baterías o del circuito.

Un ejemplo de qué pueda conseguirse con una soldadura láser lo tenemos representado por el sistema automático fabricado por la Hamilton Standard Division, de la United Technologies Corporation, para soldar electrodos de baterías. Se funda en el láser de dióxido de carbono de tres kilowatt construido también por la United Technologies. Según se informa, el sistema ha conseguido, en tres instalaciones distintas, un incremento de la productividad cifrado entre el siete y el diez por ciento sobre el obtenido por los sistemas convencionales. Rendimiento al que hemos de sumar una destacada mejora en el control de la calidad.

Soldaduras mayores, donde intervengan partes de más de 4 milímetros de espesor, constituyen el punto de transición entre la investigación experimental y la aplicación industrial. Algunas empresas están ensayando láseres con miras a su incorporación en los trabajos de soldadura de la construcción naval, fabricación de tuberías y construcción de puentes y edificios de acero prefabricados.

En la industria aeroespacial se han realizado operaciones de soldadura por haces de electrones. El haz láser va sustituyendo a la soldadura por haz de electrones, porque aquél no precisa operar bajo vacío y éste sí. Entre las aplicaciones, citemos la soldadura interna de nervios de refuerzo en carcasas de cohetes, la soldadura interna de compartimentos de instrumentos, la soldadura de depósitos de aluminio y titanio que hayan de contener gas a elevada presión y la soldadura de álabes y engranajes para turbinas. La industria de la automoción ha dado ya los primeros pasos en la aplicación de sistemas láser a la soldadura de precisión de par-

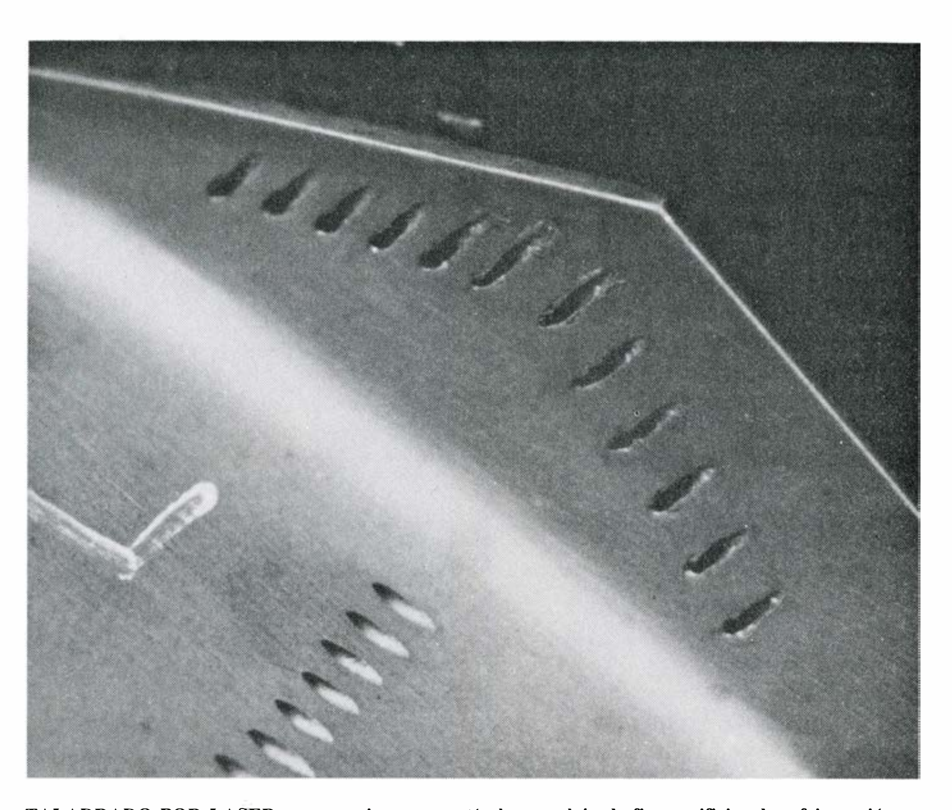
tes voluminosas: cajas de cambio y diferencial, engranajes, ejes, sensores de gases y componentes del freno.

La aplicación del calor generado por el láser al tratamiento superficial de una pieza reviste enorme interés en determinadas industrias de producción en serie. Pretende el tratamiento, cualquiera que sea la fuente de calor, conferir a la superficie de la pieza las propiedades especiales que requiere para una operación continuada bajo ciertas condiciones; entre ellas: cargas mecánicas elevadas, alta temperatura y un entorno químicamente agresivo. Dos de los principales procesos de tratamiento térmico son el recubrimiento y la aleación superficial de la pieza.

El recubrimiento añade al material base de una pieza una capa de otro material que porta las propiedades buscadas. Recordemos, por ejemplo, el recubrimiento del acero con una aleación de cobalto. A este proceso, el tratamiento térmico del láser aporta un aumento en la productividad y limpieza y un funcionamiento controlado por sistemas automatizados. El recubrimiento se realiza en las propias líneas de fabricación de la empresa, sin tener que depender de talleres metalúrgicos externos.

La aleación superficial (también llamada aleado) es un proceso industrial que el láser ha hecho posible. El material añadido puede serlo en forma de polvos, varillas, láminas o anillos de la aleación o en forma de polvo de los elementos de la aleación, que producirán la aleación en el propio sitio. ¿Qué implicaciones tiene en el diseño y en la producción de piezas? Muchas y notables. Al operar a muy alta intensidad, el haz láser genera rápidamente la elevada temperatura y los gradientes térmicos que exige la aleación. A través de ellos el material añadido se funde, se agita vigorosamente y se difunde por las capas adyacentes del material base. Se consiguen unas velocidades de difusión rapidísimas. El enfriamiento súbito determina la microestructura fina de las capas aleadas. Por selección apropiada de las condiciones de aplicación del láser puede incluso ajustarse con precisión la distribución en profundidad de los elementos aleantes.

El interés del aleado superficial por láser reside en que produce piezas de notable calidad, dotadas de propiedades no comunes. A ello hay que agregar el beneficio económico que supone la reducción de la cantidad necesaria de materiales costosos, pues con el láser esos materiales se añaden sólo en las pequeñas zonas en que se precisa máxima perfección. No acaban aquí las ventajas. El material base se trabaja mejor y únicamente deben desecharse pequeñas cantidades de material de la aleación dura. (Lo frecuente en estos casos es usar como herramienta un costoso disco abrasivo de diamante, habida cuenta de que ningún otro dispositivo actuaría sobre material tan duro.)



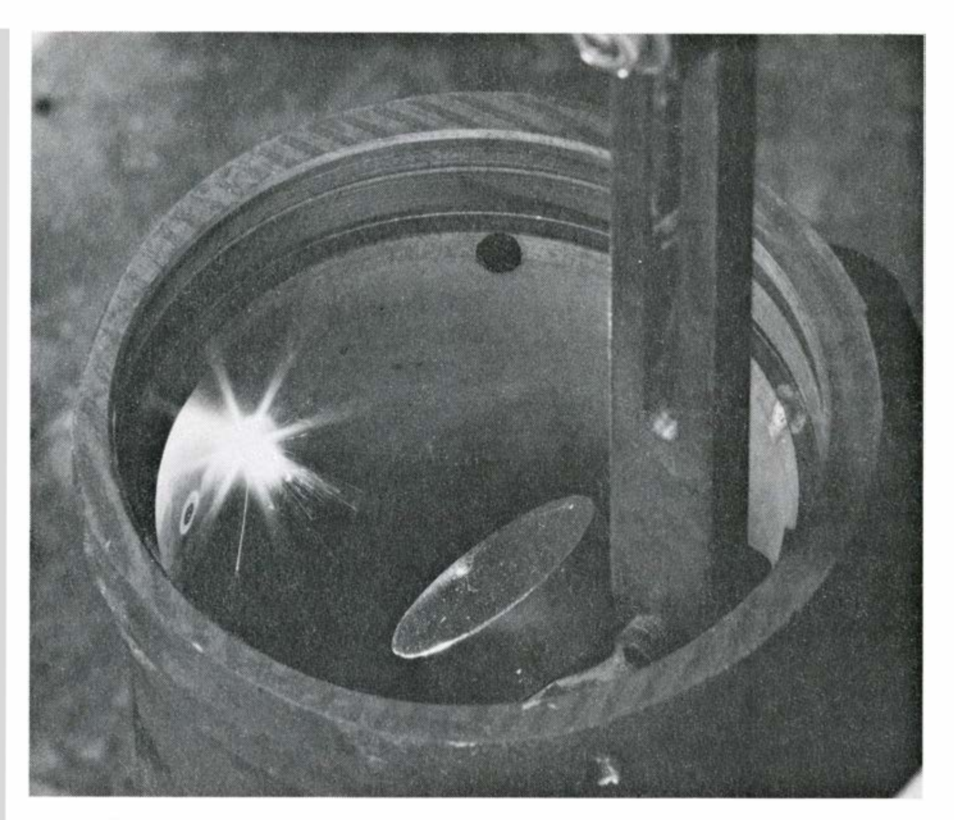
TALADRADO POR LASER, que consigue una retícula compleja de finos orificios de refrigeración en una paleta de un motor de reacción. Para que la pieza funcione correctamente hemos de controlar con precisión el diámetro y profundidad de los taladros y el ángulo de entrada del láser. El taladrado se realizó en la planta de Pratt & Whitney Aircraft Division, de la United Technologies Corporation, por un láser de rubí pulsado que suministra 45 kilowatt de potencia a la pieza en menos de un milisegundo por impulso. El láser industrial que taladra los orificios de refrigeración lo fabricó la United Technologies.

Pero el tratamiento térmico ofrece una tercera aplicación importante: la producción de cambios de fase en el material. En dicha transformación, la superficie puede ser endurecida (sin adición de material) provocando en el metal base su cambio desde una fase sólida a otra fase de dureza mayor. Para evitar la fragilización de la pieza, importa que el endurecimiento no sea demasiado profundo. Suele bastar una capa de pocos milímetros de espesor para imprimir la dureza deseada. Espesor que puede ser suficiente para obtener un estado de tensiones de compresión, que mejore la resistencia de la pieza a la fatiga.

En el endurecimiento superficial el haz láser genera un perfil de temperaturas escogido de suerte tal que la superficie se mantenga por debajo del punto de fusión mientras ocurra la transformación de fase a la profundidad deseada. Puesto que el calor se aplica únicamente a una capa superficial, el material de ésta es enfriado y templado rápidamente por la masa de la pieza. Este autotemple da a la capa tratada una estructura de grano fino. En casos extremos, como en el procedimiento conocido como satinado por láser, resulta una capa superficial totalmente amorfa o vítrea.

El endurecimiento por transformación de fase es el único tratamiento térmico que se realiza mediante láser a escala industrial. La General Motors Corporation ha puesto en marcha una macroinstalación en su Saginaw Steering Gear Division. En ella, unos 20 láseres tratan las superficies guía de las carcasas de dirección, a un ritmo de 30.000 unidades diarias. La General Motors dispone también en su Electromotive Diesel Division varios sistemas láser de cinco kilowatt, que tratan las paredes interiores de las camisas de cilindros, de fundición de hierro aleada, para los grandes motores diesel que fabrica en dicha planta.

Por mucho que nos impresionen los logros reseñados hasta aquí, recuérdese que sólo representan el comienzo de las aportaciones que habrán de acarrear a la industria la incorporación de los sistemas láser. Estamos asistiendo a la primera generación de sistemas de baja potencia (de 200 a 2000 watt). Y ya se van introduciendo otros de potencia



ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL del interior de una caja de dirección realizado por láseres, en la Saginaw Steering Gear Division, de la empresa norteamericana General Motors Corporation. La caja está fabricada por fundición maleable ferrítica. El haz láser de dióxido de carbono de 1000 watt se dirige hacia abajo, a través de una lente focalizadora sobre un espejo plaqueado con oro, que se mueve arriba y abajo dentro de la caja para endurecer la superficie en bandas igualmente distanciadas. El haz láser es invisible; el punto brillante de la fotografía procede del área del orificio que el haz está calentando.

mayor, al tiempo que crece el número de ellos instalados en líneas de producción. Cuando estén listos sistemas en el rango de 10 a 20 kilowatt afectarán, cabe inferirlo, a un sector de mucho mayor interés para la economía de las naciones industrializadas, sobre todo en las industrias de producción en serie. Para que la transición sea rentable y eficaz, las naciones y empresas empeñadas habrán de prepararse, no sólo desarrollando sistemas láseres mejores, sino revisando también todo el espectro de los procesos industriales. Así le sacarán el máximo partido de productividad y versatilidad al potencial encerrado en la nueva tecnología.

El carácter inédito de la nueva herramienta, que surgió de conocimientos y tecnologías ajenas a la actual generación de ingenieros de producción, hará difícil en un principio su introducción en las líneas de fabricación tradicionales. Por tanto, se precisa una toma de posición pragmática, empezando por las aplicaciones sencillas cuyo éxito esté asegurado. Se preferirán las aplicaciones de un solo fin, contando con los efectos combinados de diversos factores favorables, desechando la pretensión de querer utilizar al máximo la capacidad productiva del sistema láser.

Habrá que ir preparando, al propio tiempo, una segunda fase de sistemas versátiles y multivalentes, que aprovechen entera la productividad que permite el láser. Aunque las mejoras ya conseguidas son substanciales, representan una fracción pequeña de las posibilidades. Nos parecen satisfactorias por la sencilla razón de que los actuales sistemas de producción son incapaces de aceptar mayores rendimientos, principalmente en los procesos de trabajo de los metales, donde el láser supone un futuro más prometedor.

La situación cambiará radicalmente cuando los productos y las instalaciones se diseñen como un sistema unificado, que utilice todas las ventajas que ofrece la tecnología del láser. El diseño desplegará varias líneas de trabajo múltiples, bien equilibradas, de alta productividad, que se introduzcan en un único sistema láser de segunda generación. El sistema láser, centralizado y flexible, realizará, de forma precisa, todas las operaciones metalúrgicas de todas las líneas conectadas. Entonces, su altísimo rendimiento, que se diría estéril en los talleres de hoy, se aprovechará por entero y se dejará sentir su revolucionario impacto.

Supercúmulos y vacíos en la distribución de galaxias

Exploraciones del corrimiento hacia el rojo de regiones escogidas del cielo han establecido tres enormes supercúmulos de galaxias. Revelan también la existencia de gigantescos volúmenes de espacio casi vacíos

Stephen A. Gregory y Laird A. Thompson

Astrónomos y cosmólogos andan muy preocupados buscando una explicación a la aparición y distribución de aglomeraciones de materia en el universo. ¿Cuánto tiempo tardó la materia, tras la "gran explosión" hipotética del átomo primitivo hace 10.000 o 20.000 millones de años, en comenzar a soldarse para formar las estrellas y galaxias que vemos hoy? Admitamos que la materia estuviera más o menos uniformemente dispersa antes de comenzar la aglomeración: ¿Está hoy el universo, en gran escala, uniformemente poblado por agregaciones estelares de una u otra clase? Observaciones recientes acometidas por varios grupos de astrónomos van a servir para responder a esas preguntas. Ciertas exploraciones en gran escala han comprobado la existencia de supercúmulos de galaxias, es decir, de estructuras organizadas compuestas de múltiples cúmulos de galaxias. Aunque la realidad de los supercúmulos se sospechaba desde tiempo atrás, su confirmación vino acompañada de una gran sorpresa por lo menos: hay en el espacio regiones de pareja extensión que no contienen galaxias.

Para hacernos una idea del tamaño de los supercúmulos, pensemos por ejemplo que una galaxia cualquiera de las que lo conforman, que se moviera aleatoriamente, sólo podría haber cruzado una fracción del diámetro del supercúmulo en los miles de millones de años transcurridos desde que nacieron las galaxias. Los supercúmulos ofrecen una posibilidad de penetrar en la historia de la evolución que no hallaríamos en sistemas menores. A escala menor que la de los supercúmulos, la distribución original de materia queda borrada por la "mezcla" formada a lo largo de la evolución. Los astrónomos confían en que la comprensión de las mayores estructuras existentes en el universo revele qué procesos se hallan implicados en la creación de estructuras de todas las dimensiones, desde las galaxias hasta las estrellas y planetas.

Es imposible determinar quién fue el primero en intuir que los cúmulos de galaxias podrían ser miembros de agregaciones todavía mayores: los supercúmulos. Cuando se repasan artículos científicos antiguos sobre astronomía extragaláctica, se siente uno sorprendido en seguida por las afinidades entre lo que se especulaba hace 50 años y lo que, con mayor fundamento, se razona hoy. A nuestros inmediatos predecesores les faltaban sólo las herramientas observacionales que acabarían por aportar las pruebas que confirmaran algunas de las hipótesis anteriores. Aunque las observaciones en las regiones de rayos X, ultravioleta, infrarrojo y de radio del espectro electromagnético han abierto nuevas y apasionantes ventanas al universo, es de justicia reconocer que la información más importante se la han servido a la cosmología los telescopios que trabajan con luz visible y casi visible.

Antes de la invención del telescopio, podían divisarse en el cielo nocturno, además de planetas y estrellas, manchas nebulosas de luz. A medida que se desarrollaron los grandes telescopios en el siglo XIX, algunas nebulosas se resolvieron en estrellas individuales. Había astronómos que sostenían que tales nebulosas eran grandes sistemas independientes de estrellas, fuera ya de nuestro propio sistema. En cualquier caso, las posiciones de las nebulosas que aparecen relacionadas en el *General Catalogue* de 1864, de John Herschel, y en el *New General Catalogue* de 1888, de J. L. E. Dreyer, muestran claramente la tendencia al agrupamiento.

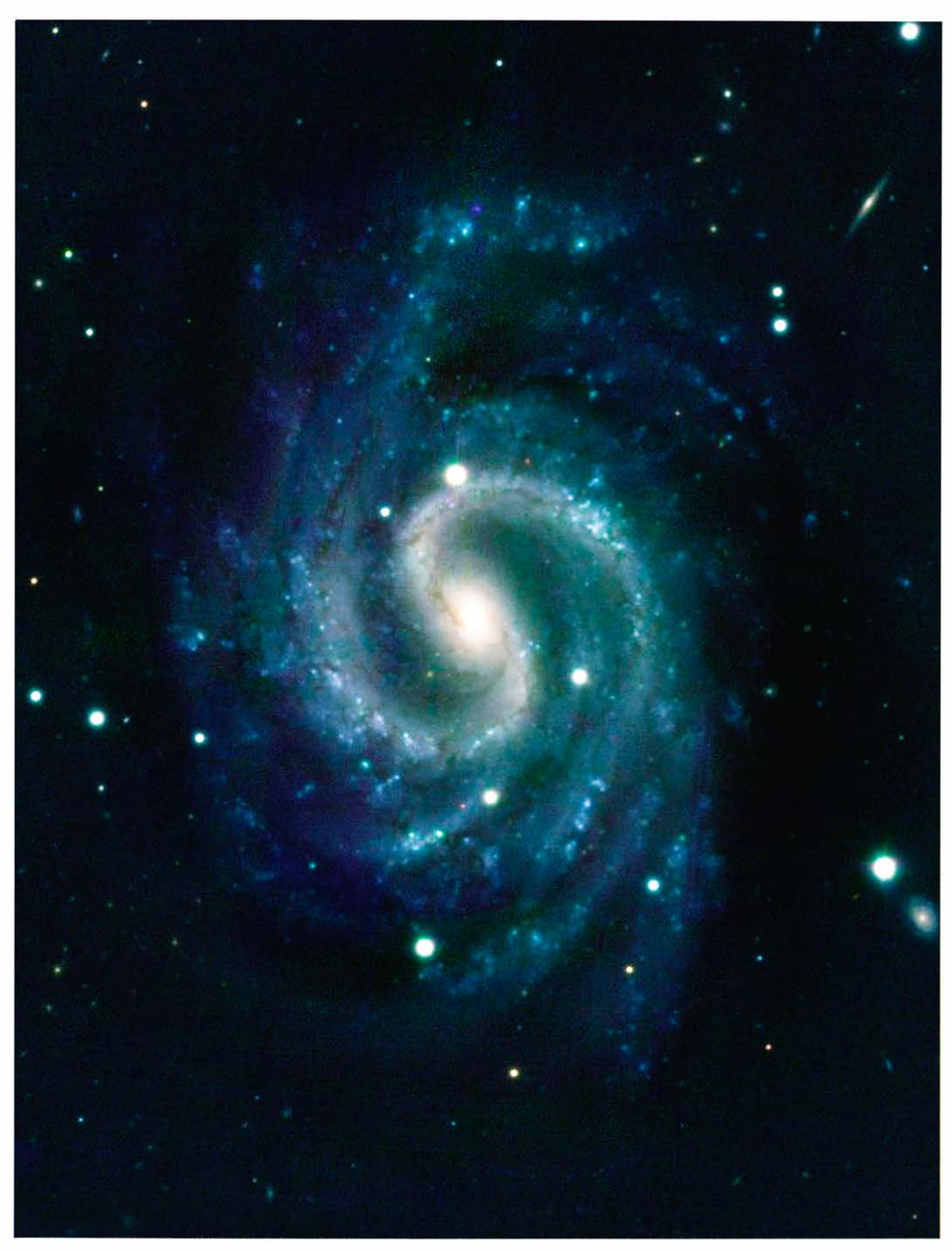
Y así fue como los astrónomos que creían que algunas nebulosas eran sistemas externos comenzaron a especular acerca de su tendencia a la agrupación. En 1908, el astrónomo francés C. V. L. Charlier esbozó una cosmología caracterizada por una jerarquía de agrupaciones. Identificó cierto número de cúmulos nebulares, dos de ellos sitos en las constelaciones de Virgo y Coma de Berenice. En 1922, el astrónomo británico J. H. Reynolds observó que una banda de nebulosas parecía extenderse desde la Osa Mayor hasta Virgo, pasando por el Coma de Berenice y cubriendo una distancia de unos 40 grados en el cielo del hemisferio Norte. Aunque Reynolds creyó que esas nebulosas quedaban dentro de nuestro propio sistema estelar, podemos considerarlo el primero en identificar lo que ahora se conoce como el Supercúmulo Local, del que nuestra galaxia es miembro.

A mediados del decenio de 1920, Edwin P. Hubble, del Observatorio de Monte Wilson, demostró que muchas nebulosas eran en realidad galaxias externas. Hacia 1929, anunció su gran descubrimiento, al que llegó en colaboración con Milton L. Humason: cuanto más distante se encuentra una galaxia (a juzgar por su brillo relativo), tanto más corrida está su luz hacia el extremo rojo del espectro. Esos corrimientos hacia el rojo indican que las galaxias están alejándose de nosotros (y entre sí) como parte de la expansión del cosmos. La relación entre distancia y corrimiento hacia el rojo recibe hoy el nombre de ley de Hubble. Y en ella se apoya la moderna cosmología observacional.

El valor del corrimiento hacia el rojo, z, se obtiene restando la longitud de onda en reposo (o longitud de onda no corrida hacia el rojo) de las líneas espectrales estelares de una galaxia, de



NUCLEO DEL CUMULO DE GALAXIAS en la constelación Coma de Berenice. Constituye una pequeña parte del vasto supercúmulo que incorpora, además del cúmulo del Coma, otro cúmulo rico, el A1367. Se representa en una imagen en color reconstruida a partir de fotografías en blanco y negro. En la fotografía original se pueden contar al menos 300 galaxias elípticas moderadamente brillantes y galaxias del tipo designado SO, cada una de las cuales es un conjunto de decenas de miles de millones de estrellas a una distancia de unos 300 millones de años-luz. El único objeto prominente de la fotografía que no es galaxia es una brillante estrella azul, ligeramente por encima y a la derecha del centro, que es un miembro próximo de nuestra propia galaxia. Las dos galaxias elípticas gigantes que flanquean el centro están dominadas por la luz rojiza de estrellas mucho más antiguas. La imagen se preparó en el Observatorio Nacional de Kitt Peak con ayuda de un monitor de televisión controlado por ordenador, en el cual se pueden mezclar cuidadosamente los colores apropiados a las imágenes en blanco y negro registradas separadamente en las regiones roja, verde y azul (o ultravioleta) del espectro electromagnético. Las fotografías originales fueron hechas por uno de los autores (Thompson) con el telescopio Schmidt de 1,2 metros de Monte Palomar.



GALAXIA ESPIRAL NGC 4535, situada en la constelación de Virgo, a unos 60 millones de años-luz de distancia. Pertenece al Supercúmulo Local de galaxias centrado en el cúmulo de Virgo. Nuestra propia galaxia está situada en un cúmulo escasamente poblado llamado Grupo Local, considerado hoy miembro periférico del Supercúmulo Local. El tinte rojo-anaranjado del núcleo de NGC 4535 revela abundancia de estrellas antiguas y frías. Los nudos azules de los brazos espirales definen regiones donde se han formado recientemente estrellas jóvenes y calientes. Se cree que NGC 4535 se parece a nuestra galaxia en morfología, tamaño y luminosidad. La imagen fue reconstruida a partir de otras hechas por Thompson con el Schmidt de Monte Palomar.

la longitud de onda observada, y dividiendo la diferencia por la longitud de onda en reposo. El mayor valor del corrimiento hacia el rojo hallado por Humason (en las postrimerías de la década de 1940) fue de 0,2, lo que correspondía a una velocidad de alejamiento de unos 60.000 kilómetros por segundo, es decir, un 20 por ciento de la velocidad de la luz. No hay acuerdo general sobre el valor para la relación de Hubble, pero uno plausible iguala una velocidad de recesión de 75 kilómetros por segundo con una distancia de un millón de parsecs, unos 3,26 millones de años-luz. La galaxia de Humason con un corrimiento hacia el rojo de 0,2 estaría, por tanto, a una distancia de 2600 millones de años-luz. Los objetos más remotos conocidos, los quasars, con corrimientos hacia el rojo de hasta 3,5, se alejan, al parecer, a velocidades superiores al 90 por ciento de la velocidad de la luz. Se presume que se encuentran a una distancia de unos 15.000 millones de años-luz.

En el decenio de 1930, tanto Hubble como Harlow Shapley, del Harvard College Observatory, llamaron la atención sobre cierto hecho: en el hemisferio Norte galáctico (donde caían las constelaciones de Virgo y Coma de Berenice), las galaxias brillantes abundaban más que en el hemisferio Sur. Hubble fotografió también muchas galaxias cuya extrema debilidad le indujo a pensar que había encontrado un probable final al fenómeno de agrupamiento. "Por primera vez –dijo– la región observable ahora con los telescopios existentes puede constituir, verosímilmente, una muestra adecuada de la totalidad del universo."

Otra de las contribuciones de Hubble, que es pertinente para nuestra discusión, tiene que ver con el esquema de clasificación de las formas de las galaxias. Las dividió en dos clases principales: galaxias elípticas y espirales, con varias subcategorías. Las elípticas se extienden desde la forma esférica hasta la lenticular; suelen carecer de rasgos estructurales. Las galaxias espirales, así la nuestra, son discos aplanados en los que hay brazos espirales generalmente visibles (salvo que el disco se vea de canto). Más tarde se encontró un tercer grupo, las galaxias SO, dotado de propiedades intermedias.

Hacia 1950, los astrónomos tenían ya motivos para coincidir en lo relativo a las características generales de los cúmulos de galaxias. Se conocían varios muy nutridos, siendo el de Coma el mayor, con más de 1000 miembros. Se había observado que los integraban, predominantemente, galaxias elípticas y SO. Hasta la mitad de las galaxias se hallaban adscritas a cúmulos; la otra mitad restante, clasificada como objetos "de campo", se suponían aisladas, en su mayor parte espirales, situadas muy alejadas de los dominios de los cúmulos. Algunos astrónomos sugirieron que la región de Virgo podía constar de más de un solo cúmulo; por el contrario, el modelo de Charlier de una jerarquía de cúmulos, en sucesión creciente, parecía condenado por el recuento de Hubble de galaxias débiles.

Gerard de Vaucouleurs, de la Universidad de Texas en Austin, quien ha venido estudiando las galaxias más brillantes en el hemisferio galáctico septentrional desde comienzos del decenio de 1950, fue el primero en definir y describir el Supercúmulo Local. En su trabajo demuestra que está centrado en el cúmulo de Virgo, a una distancia de unos 60 millones de años-luz, y tiene quizá 50 cúmulos a su alrededor, llamados grupos, junto con galaxias individuales dispersas entre ellos. Nuestra propia galaxia cae en uno de los cúmulos ralos, en lo que los astrónomos llaman el Grupo Local, lo que prueba, con bastante seguridad, que se trata de un acompañante externo del gran supercúmulo.

Un segundo avance importante en los últimos 30 años es el del creciente convencimiento de que el Supercúmulo Local no constituye un caso único. Entre 1950 y 1954 se cartografió la totalidad del cielo septentrional con el telescopio Schmidt de gran ángulo de 1,2 metros de Monte Palomar. Poco después, George O. Abell, de la Universidad de California en Los Angeles, compiló un catálogo de 2712 cúmulos ricos de galaxias. Abell indicó que muchos parecían miembros de supercúmulos que tuvieran un promedio de cinco o seis cúmulos cada uno. Su propuesta, sin embargo, encontró una seria objeción en otro catálogo de cúmulos compilado, a partir de la misma fuente, por Fritz Zwicky y sus colaboradores en el Instituto de Tecnología de California. El catálogo de Zwicky sugería que los cúmulos no formaban cúmulos de orden superior. El desacuerdo se puede resolver con la siguiente precisión: los cúmulos, tal como los define Zwicky, suelen ser mayores que los de Abell y comprenden varios centros donde se arraciman las galaxias.

Hacia la misma época, pero basándose en una exploración diferente (realizada en el Observatorio Lick), Jerzy Neyman, Elisabeth L. Scott y C. D. Shane, de la Universidad de California en Berkeley, informaron haber hallado enormes "nubes de galaxias", su designación para los supercúmulos. También sugirieron, a modo de consecuencia provisional de su estudio, que cada galaxia del universo pertenecía a un cúmulo; no podrían existir galaxias aisladas. Más recientemente, P. J. E. Peebles y sus colaboradores, de la Universidad de Princeton, han llevado a cabo un análisis exhaustivo y formal de todos los catálogos de galaxias existentes. Han cuantificado la totalidad del espectro de acumulación de galaxias y llegan a la conclusión, entre otras cosas, de que los cúmulos tienden a situarse próximos entre sí.

Un tercer desarrollo importante en el análisis del fenómeno de acumulación desde 1950 ha sido la introducción de exploraciones a gran escala dedicadas a la medición de los corrimientos hacia el rojo. El primer paso en tal exploración es medir el corrimiento hacia el rojo de todas las galaxias de brillo superior a cierto débil umbral en una región escogida del cielo. Aplicando la ley de Hubble a los corrimientos hacia el rojo observados, se puede estimar la distancia de cada galaxia. Este enfoque goza de varias ventajas sobre el análisis estadístico de los catálogos existentes de galaxias, que suministran sólo las dos coordenadas angulares de posición de las galaxias, es decir, las dos que se pueden medir en el plano del cielo. A partir de los datos del catálogo existente, la tercera dimensión, la distancia, sólo cabe deducirla del brillo de la galaxia. En el método de exploración del corrimiento hacia el rojo, la distancia se infiere explícitamente a partir de la ley de Hubble. Pero el método tiene un inconveniente: mientras de una fotografía se pueden deducir miles de posiciones de galaxias, los corrimientos espectrales hacia el rojo solamente pueden obtenerse de uno en uno. Los dos métodos son, sin embargo, complementarios. Los estudios de catálogos pueden analizar grandes números de galaxias en grandes volúmenes del universo; los estudios de corrimiento hacia el rojo cubren las tres dimensiones en muestras de volumen mucho más pequeño.

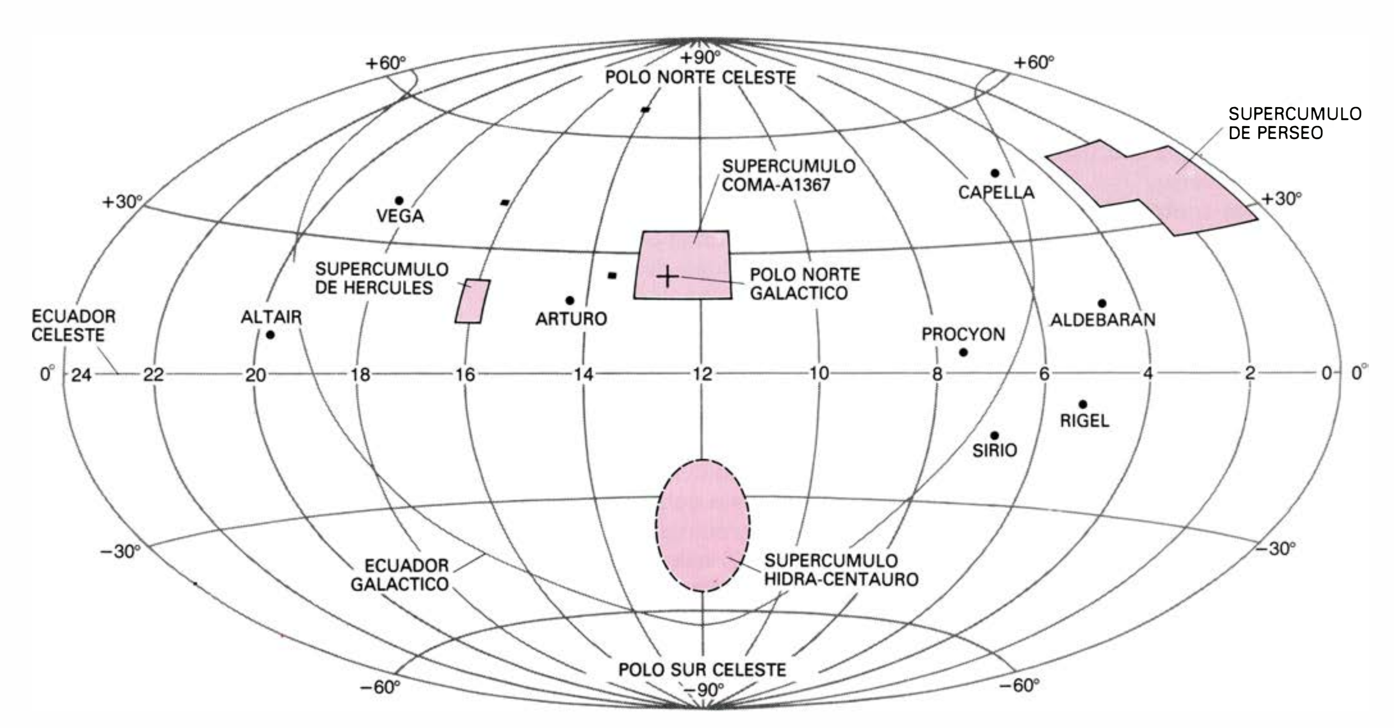
Importantes avances registrados en la instrumentación telescópica posibilitaron las exploraciones, a gran escala, de corrimientos hacia el rojo. Aunque Hubble y Humason tuvieron acceso a los mayores telescopios (el reflector de 2,5 metros de Monte Wilson y después

el de 5 metros de Monte Palomar), las emulsiones fotográficas disponibles eran lentas, comparadas con las actuales. Las modernas cámaras espectrográficas suelen incorporar un dispositivo electrónico que intensifica la imagen en un factor de hasta 20, por lo menos, antes de penetrar en el detector. Para ciertas observaciones cabe usar detectores digitales muy sensibles, habilitados para contar fotones uno a uno. Merced a estos y otros adelantos, los astrónomos registran en media hora la información espectrográfica que a Hubble y sus contemporáneos les hubiera costado toda la noche.

Tiene su interés histórico recordar que la primera exploración de corrimientos hacia el rojo se presentó en una conferencia celebrada en 1960 sobre la aplicación de tubos intensificadores de imagen a la astronomía. Con uno de los nuevos dispositivos, Nicholas U. Mayall, trabajando con el reflector de 305 centímetros del Observatorio Lick, había registrado los espectros de 40 de las 82 más brillantes galaxias situadas en el intervalo de cuatro grados del centro del cúmulo de galaxias en Coma Berenice. En 1972, Herbert J. Rood y Thornton L. Page, de la Wesleyan University, completaron y extendieron la exploración inicial de Mayall. Nuevos corrimientos hacia el rojo fueron registrados por Eric C. Kintner, de la Wesleyan, quien analizó la muestra aumentada en colaboración con Rood, Page e Ivan R. King, de la Universidad de California en Berkeley. Su artículo representa el primer estudio moderno y detallado de los corrimientos hacia el rojo en un cúmulo de galaxias. Exponían en él que el cúmulo estaba predominantemente formado por galaxias elípticas y SO, algunas de ellas moviéndose con velocidades de más de 1000 kilómetros por segundo, y que no pudieron situar el límite del tamaño del cúmulo.

Unos cuatro años más tarde, William G. Tifft, de la Universidad de Arizona, y uno de los autores (Gregory), ampliaron la exploración de Coma Berenice a límites angulares más anchos y débiles. Descubrimos que el propio cúmulo del Coma terminaba a tres grados del centro y que cierto número de galaxias constituían una proyección en forma de brazo dirigida hacia el Oeste, apuntando hacia el cúmulo más próximo A1367 y tal vez enlazando con él. (A1367 significa cúmulo n.º 1367 en el catálogo de Abell. El cúmulo del Coma es A1656.) Nuestro análisis puso de relieve que las exploraciones del corrimiento hacia el rojo no sólo proporcionaban un cuadro detallado de los cúmulos de galaxias distantes, sino que aportaban también una información valiosa acerca de galaxias que quizá se situaran en primer plano. Como estas galaxias parecen hallarse en las ralas aglomeraciones llamadas grupos (o nubes si todavía son más ralas), basta una exploración de corrimientos hacia el rojo para identificar agrupaciones de muchos tamaños diferentes, desde el mayor hasta el menor. Las escasas muestras de primer plano pueden enseñarnos sobre la formación de los cúmulos y sobre los cúmulos ricos más espectaculares. Nuestro análisis puso también sobre el tapete la escasez de galaxias de campo.

En un área de investigación en rápida evolución como ésta, los astrónomos repiten las mismas observaciones u observaciones semejantes sin previo acuerdo. Ocurrió así que Rood y Guido L. Chincarini, de la Universidad de Oklahoma, que habían venido estudiando galaxias al Oeste del cúmulo del Coma, hallaron que el brazo hacia el Oeste de dicho cúmulo se seguía detectando a una distancia de más de 14 grados. Sugirieron, en otro orden, que podía haber un puente de galaxias que enlazara el cúmulo del Coma y el A1367. En este punto, los autores de este artículo (Gregory y Thompson) iniciamos una exploración que sistemáticamente extendió la exploración del Coma hacia el Oeste hasta alcanzar A1367. Nuestro análisis, más completo, confirmó la existencia de un enlace en forma de puente entre los dos cúmulos. De aquí



POSICION DE CUATRO SUPERCUMULOS, mostrada en una proyección homolográfica de la esfera celeste. El cúmulo Hidra-Centauro, en el hemisferio Sur, espera que alguien lo estudie de una manera sistemática. El primer supercúmulo en descubrirse fue el del sistema Coma-A1367. Los autores estiman que contiene bastante más de un millón de galaxias, 280 de cuyos corrimientos hacia el rojo se han medido ya. Ocupa un volumen de 10^{23} años-luz cúbicos, por lo menos. Los tres cuadrados negros (*izquierda*) identifican regiones en las que una reciente exploración muestra una casi total ausencia de galaxias con velocidades de alejamiento de entre 12.000 y 18.000 kilómetros por segundo, correspondiendo al intervalo entre 520 y 780 millones de años-luz. Si la región comprendida entre las tres zonas exploradas carece asimismo de galaxias, el vacío tendría un volumen de unos 30 × 10^{24} años-luz cúbicos.

que un estudio que había comenzado con la observación de Mayall de 40 galaxias en un área de 16 grados cuadrados llegó finalmente a cubrir 238 galaxias en 260 grados cuadrados y, en el proceso, estableció la existencia de un verdadero supercúmulo.

El cúmulo del Coma está situado cerca de la prolongación del polo de nuestra galaxia, casi apartado 90 grados del velo de polvo y gas que limita la visibilidad en el plano central de la galaxia. En nuestro estudio del supercúmulo Coma-A1367, decidimos obtener espectros de todas las galaxias de brillo superior a la magnitud 15, es decir, aproximadamente un millón de veces más débiles que Vega, la más brillante estrella del cielo septentrional. Cuando las galaxias de nuestra muestra se representan en dos dimensiones, como aparecen en el cielo, se pueden ver dos concentraciones principales: el propio cúmulo del Coma, en el ángulo Nordeste, y A1367 en el ángulo Suroeste [*véase la ilustración de la página siguiente*]. Aparte de ello, uno se forma la fuerte impresión visual de que el mapa está constituido por muchas galaxias sueltas y distribuidas más o menos al azar entre los dos centros.

Si representamos ahora gráficamente los resultados de la exploración del corrimiento hacia el rojo al objeto de mostrar cómo están distribuidas las mismas galaxias en la tercera dimensión, esto es, según su distancia, aparecerá un cuadro completamente diferente. Nos bastan dos coordenadas de posición: distancia radial (deducida del corrimiento hacia el rojo) y ángulos Este-Oeste en el cielo [*véase la ilustración de la página 84*]. En esta ilustración se ve que las galaxias gozan de una distribución mucho menos uniforme.

Hay algunas pequeñas aglomeraciones próximas a nuestra propia galaxia, representada por el vértice de la cuña. Sin embargo, el rasgo más impresionante lo constituye una región densamente poblada que se extiende de un lado a otro del mapa a una distancia de 315 millones de años-luz. Característica que define al supercúmulo, pues incorpora dos cúmulos ricos, Coma y A1367, y varios cúmulos menos nutridos que, juntos, forman una estructura megagaláctica continua que se extiende a lo largo de más de 70 millones de años-luz de un extremo al otro.

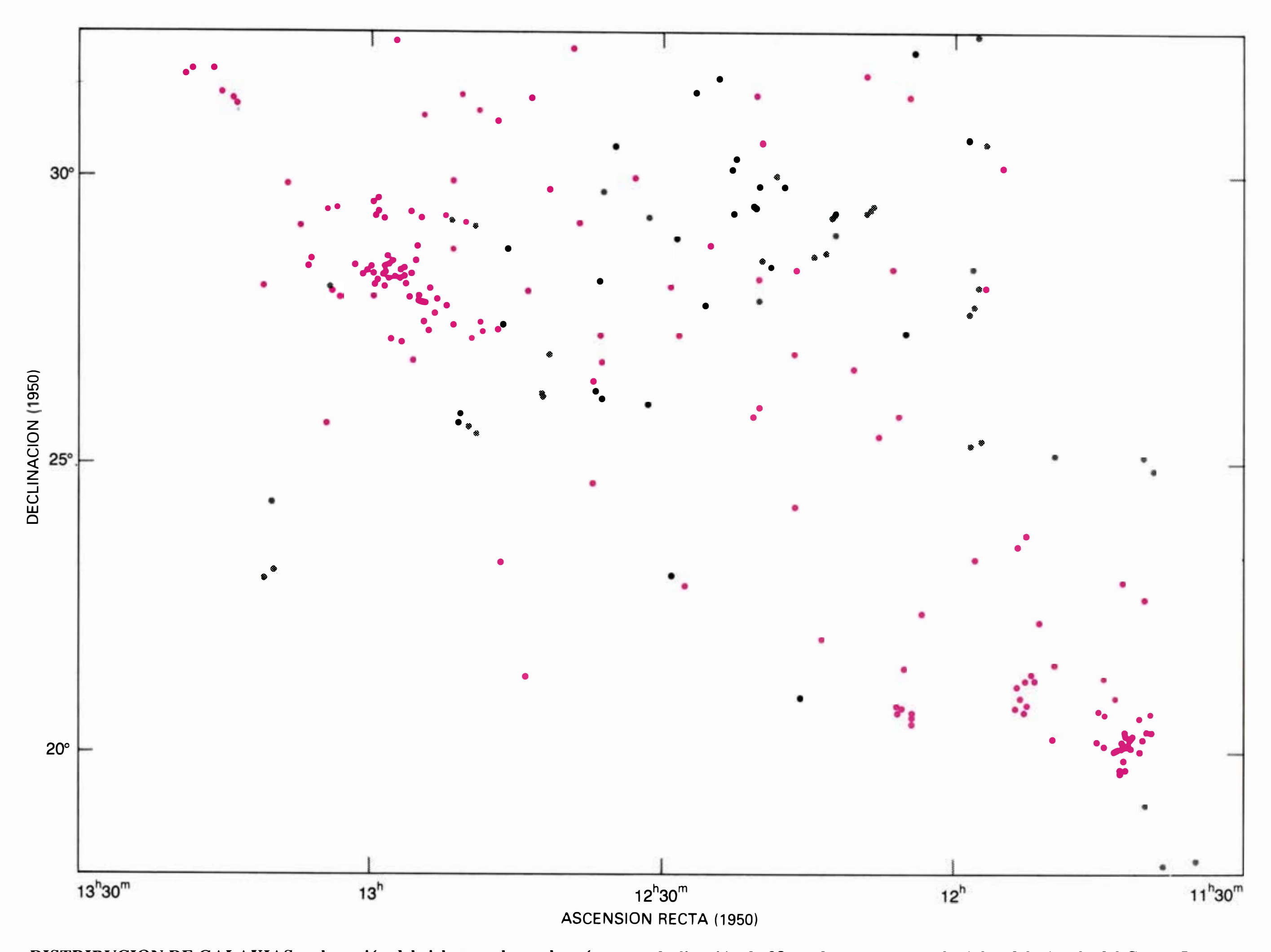
De manera algo sorprendente, el mapa también muestra algunos "vacíos", o regiones aparentemente desprovistas de galaxias. Por la época en que completamos el estudio teníamos la seguridad de que dichos vacíos eran reales,

pero abrigábamos dudas acerca de su universalidad. No había razones para negar que fueran privativos de esta región particular del cielo.

Los supercúmulos mismos, al igual que las galaxias individuales, difieren en estructura y contenido; sería deseable, pues, tener otros ejemplos además del supercúmulo Coma-A1367 antes de generalizar acerca de sus propiedades. Tres más de esos grandes sistemas, al menos, constituyen hoy materia de estudio; todos ellos muestran características inesperadamente distintas. La región que rodea al cúmulo de Hércules ha sido investigada recientemente por uno de los autores (Thompson) en colaboración con Chincarini, Rood, Tifft y Massimo Tarenghi, trabajando con los telescopios de dos metros en el Observatorio Steward de la Universidad de Arizona y del Observatorio Nacional de Kitt Peak. Nuevamente las pruebas observacionales muestran la presencia de un complejo supercúmulo que ocupa una ancha banda a una distancia de entre 400 y 600 millones de años-luz. A diferencia del supercúmulo Coma-A1367, el sistema de Hércules no está dominado por uno o dos cúmulos. No obstante, se parece al Coma-A1367 en que presenta una vasta región vacía en primer plano. Quizás el aspecto más sorprendente del sistema de Hércules, sin embargo, sea que sus cúmulos más densos están dominados por galaxias espirales, no por galaxias elípticas. Esta peculiaridad, por sí sola, dota de especial valor al sistema de Hércules.

El tercer supercúmulo objeto de estudio cae en la región del cielo que coincide con las constelaciones de Perseo y Piscis. Se parece a un largo filamento que se extiende a lo largo de más de 40 grados en el cielo, desde el cúmulo de galaxias de Perseo, bien conocido, hasta un pequeño grupo de galaxias cerca de la galaxia elíptica NGC 383. Nuevas observaciones, acometidas por nosotros en colaboración con Tifft, ponen de manifiesto que el espesor del filamento aparente no rebasa su anchura en el cielo. Cabe, pues, suponer que nos hallamos ante un verdadero filamento y que las galaxias individuales inscritas dentro de ese sistema tienen movimiento aleatorios, de velocidades relativamente pequeñas. Hay pruebas también de que muchas de las galaxias del sistema Perseo-Piscis poseen planos de rotación que, o bien son paralelos al eje del filamento del supercúmulo, o son perpendiculares a él. Esta observación, caso de confirmarse, nos puede revelar algo acerca de la manera cómo se forman las galaxias y los supercúmulos.

Las tres exploraciones de corrimiento hacia el rojo cubren sólo alrededor del dos por ciento de la totalidad del cielo. Varios grupos adscritos a distintos observatorios están tratando de obtener un cuadro más completo del fenómeno de la superacumulación. Así,



DISTRIBUCION DE GALAXIAS en la región del cielo que abarca los cúmulos Coma y A1367, cartografiada por los autores en su extensa exploración de corrimientos hacia el rojo. Las galaxias más distantes se representan en rojo en el mapa, las más próximas en negro y las que están a distancias intermedias, en gris. La densa concentración de galaxias a la ascensión recta de 13 horas y declinación de 28 grados representa el núcleo del cúmulo del Coma. La agregación menor a la ascensión recta de 11 horas 40 minutos y declinación 20 grados representa el cúmulo A1367. Como las galaxias de las demás regiones parecen hallarse bastante dispersas, los astrónomos llegaron a la errónea conclusión de que la mayoría de las galaxias estaban distribuidas al azar.

Jaan Einasto, Mikhel Jôeveer, Enn Saar y S. Tago, de la R.S.S. de Estonia, quienes descubrieron independientemente la existencia del supercúmulo de Perseo y de los vacíos, han analizado el mayor catálogo existente de corrimientos hacia el rojo galáctico. Aunque su catálogo carece de la minuciosidad de nuestras recientes exploraciones de corrimientos hacia el rojo, les ha permitido comprobar en mayor escala las mismas características halladas en exploraciones más detalladas.

De manera análoga, Chincarini y Rood han analizado la distribución de galaxias espirales gigantes observada primeramente por Vera C. Rubin, W. Kent Ford, Jr., y sus colaboradores en el Departamento de Magnetismo Terrestre de la Institución Carnegie de Washington. La exploración Rubin-Ford, que cubre la totalidad del cielo, presenta poco detalle en cualquier región particular. Pero permitió a Chincarini y Rood comprobar la existencia de los tres supercúmulos que hemos mencionado y añadir una estructura no reconocida antes en el hemisferio Sur: el supercúmulo de la Hidra-Centauro. Los trabajos de Chincarini y Rood y de Einasto, Jôeveer, Saar y Tago sugieren, sin ambages, que los supercúmulos se extienden mucho más allá de las regiones cubiertas en nuestras exploraciones de corrimiento hacia el rojo. Según sus cálculos, los supercúmulos Coma-A1367 y Perseo pueden ocupar un área del cielo 10 veces mayor que el área que nosotros habíamos cautamente propuesto.

Esta hipótesis se ve corroborada por una exploración realizada por Robert P. Kirshner, de la Universidad de Michigan, Augustus Oemler, Jr., de la Universidad de Yale, Paul L. Schechter, de Kitt Peak, y Stephen A. Schectman, de los observatorios del Monte Wilson y Las Campañas. Dicha observación cubre tres pequeñas regiones del hemisferio galáctico septentrional. En cada región hallan galaxias con corrimientos hacia el rojo semejantes a los observados en el supercúmulo Coma-A1367. También creen haber detectado un inmenso vacío, cuyo volumen puede acercarse a los 30×10^{24} años-luz cúbicos. En sus pequeñas áreas de búsqueda, centradas en la vecindad del polo Norte galáctico, parece haber una ausencia, casi total, de galaxias con corrimientos hacia el rojo de entre 12.000 y 18.000 kilómetros por segundo. En unos cuatro grados cuadrados de cielo, donde esperaban encontrar unas 25 galaxias con corrimientos hacia el rojo en ese margen, sólo descubrieron una de ellas. Para calcular el tamaño del vacío, que sería con mucho el mayor conocido, se parte de la hipótesis según la cual la región entre los puntos de toma de muestra está igualmente privada de galaxias. El vacío se encuentra a una distancia entre 520 y 780 millones de años-luz.

Fundados en las exploraciones actuales, hemos transcrito la distribución tridimensional de galaxias en tres supercúmulos bien conocidos: Coma-A1367, Hércules y Perseo [*véase la ilustración de la página 86*]. En esta representación, nuestra galaxia se halla en el centro. Las tres exploraciones proporcionan ventanas en forma de cuña que se abren a la inmensidad del cosmos. Se ve la omnipresente tendencia de las galaxias a agruparse. La existencia de los vacíos, que inicialmente aceptamos sólo de mala gana, no puede ya ponerse en duda. El universo se podría haber distribuido a sí mismo de manera que el espacio entre cúmulos no estuviera ocupado por vacíos, sino por muchos pequeños grupos de galaxias. No ocurre así. Los vacíos constituyen parte integral del proceso de formación de cúmulos y supercúmulos.

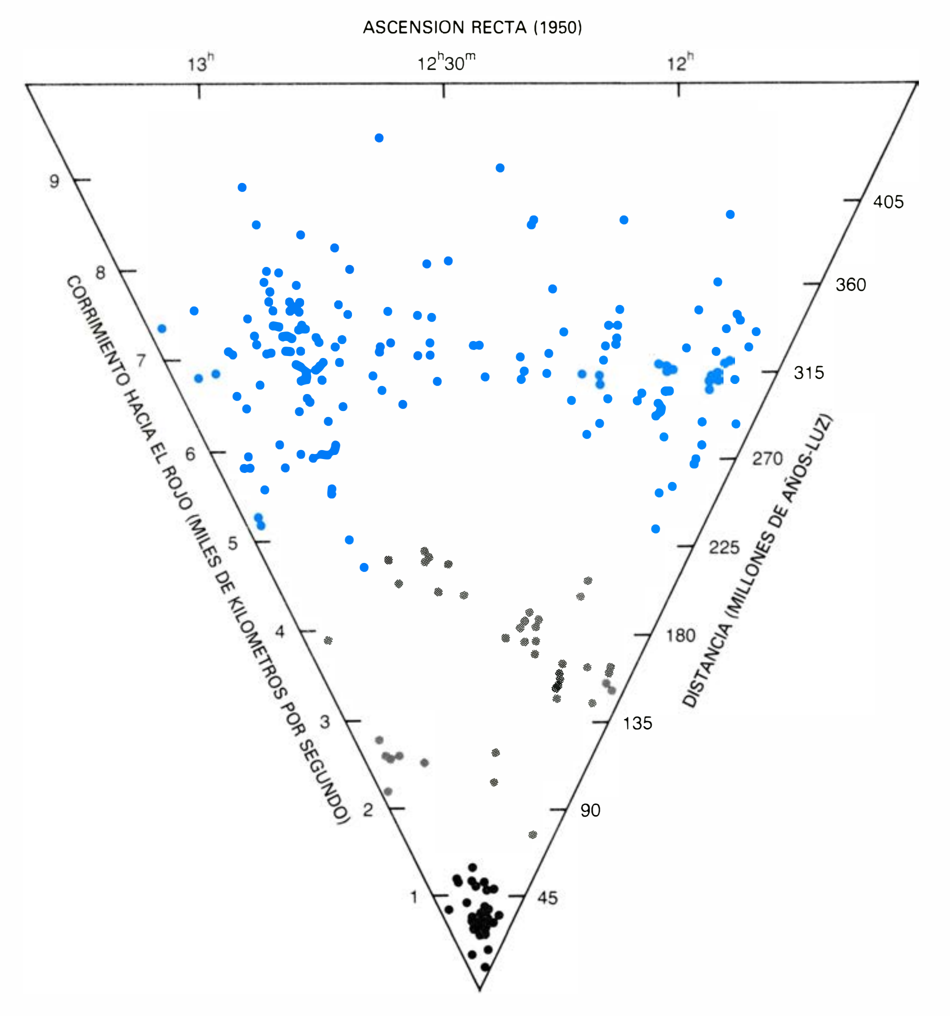
El estudio de los supercúmulos no queda reservado a la astronomía óptica; la radioastronomía y la astronomía de rayos X están también haciendo contribuciones fundamentales. Los radioastrónomos pueden detectar la presencia de gas intergaláctico mostrando que algunas radiofuentes en cúmulos y supercúmulos han sido distorsionadas por lo que, presumiblemente, constituye un gas de baja densidad y alta temperatura. Si el gas llena los supercúmulos en su totalidad de la misma manera que llena las más densas regiones de cúmulos, su contribución a la masa total del supercúmulo podría ser tremenda.

Los astrónomos de rayos X han detectado ya gas extremadamente caliente en la dirección de los supercúmulos distantes. No está claro, sin embargo, si la emisión proviene exclusivamente de los núcleos de cúmulos brillantes o si parte de la emisión se origina en las regiones entre los núcleos de los cúmulos. Jack O. Burns, Jr., de la Universidad de Nuevo México, y uno de los autores (Gregory) están combinando datos procedentes de la exploración de corrimiento hacia el rojo de Kitt Peak, radiomapas de fuentes distorsionadas obtenidos con el radiotelescopio Gran Distribución de Socorro, Nuevo México, e imágenes de rayos X procedentes del satélite Einstein de rayos X, para examinar una muestra completa de cúmulos.

Hay otros astrónomos que están aplicando los métodos de la radioastronomía en sus propias exploraciones de corrimientos hacia el rojo. Se determinan éstos observando el corrimiento de la línea de 21 centímetros debida a la radioemisión del hidrógeno neutro (no ionizado) en el espacio interestelar. Una exploración, realizada por J. Richard Fisher y R. Brent Tully, de la Universidad de Hawai en Manoa, ha cartografiado las galaxias del Supercúmulo Local hasta alcanzar el vacío más próximo. El radiotelescopio más sensible disponible para tales estudios es la antena de 303 metros de Arecibo, en Puerto Rico, donde se están realizando estudios sobre los tres supercúmulos que hemos descrito. Entre los astrónomos que trabajan en esos proyectos se cuentan Chincarini, Thomas M. Bania, Riccardo Giovanelli, Martha P. Haynes, Trinh Xuan Thuan y Thompson (coautor de este artículo). Las observaciones resultan muy provechosas: nos suministran corrimientos adicionales hacia el rojo en galaxias y aportan datos sobre hidrógeno neutro en varias posiciones dentro de los supercúmulos. Aunque estos estudios no han llegado lo bastante lejos para dar fundamento a nuevas conclusiones respecto a las condiciones dentro de los supercúmulos, reservan grandes promesas para el futuro.

Las exploraciones de corrimientos hacia el rojo han puesto de manifiesto con toda claridad que la presente distribución de galaxias es altamente heterogénea hasta una distancia de varios cientos de millones de años-luz. Parece probable que tal heterogeneidad se extienda hasta miles de millones de años-luz y sea característica de la totalidad del universo. Debemos puntualizar, sin embargo, la posibilidad de que el universo encierre mucha materia que no es luminosa. La verosímil existencia y volumen de tal materia constituye hoy tema de amplio debate.

Si nos enfrentamos ahora con un universo heterogéneo, hay indicaciones de que, en épocas muy remotas de su existencia, era homogéneo. Pruebas que tienen que ver con el hecho siguiente: la blanda radiación de fondo que baña la Tierra a las longitudes de onda de las microondas es notablemente uniforme con respecto a la dirección. Domina la idea de que la radiación de fondo representa el resto, expandido y enfriado, del universo primitivo y caliente. En términos generales, la radiación de fondo en microondas es homogénea en una parte en 3000. Recientemente, sin embargo, se han detectado



"VISTA EN PLANTA" DEL SUPERCUMULO COMA-A1367, construida sobre la base de la exploración del corrimiento hacia el rojo realizada por los autores. Las galaxias son las mismas que aparecen en la ilustración precedente, pero están distribuidas según sus velocidades de alejamiento, deducidas de sus corrimientos hacia el rojo. La constante de Hubble, que relaciona la velocidad de alejamiento con la distancia, proporciona la escala del lado derecho del triángulo. Aquí se ha adoptado el factor de conversión siguiente: una velocidad de alejamiento de 1000 kilómetros por segundo corresponde a una distancia de 43,5 millones de años-luz (o 75 kilómetros por segundo por millón de parsecs). Nuestra galaxia estaría en el vértice inferior del triángulo a una distancia de cero años-luz. Se aprecia ya que el cúmulo del Coma (que está a la ascensión recta de 13 horas con una velocidad de alejamiento de unos 7000 kilómetros por segundo) y el cúmulo A1367 (que está a 11 horas 40 minutos con la misma velocidad de alejamiento) son los extremos, densamente poblados, de una banda continua de galaxias que se extiende a través del cielo a una distancia, desde nuestra galaxia, de unos 315 millones de años-luz. Esta banda de galaxias es el supercúmulo Coma-A1367. Nótense los enormes vacíos donde la exploración no encontró galaxia alguna.

algunas heterogeneidades de pequeña amplitud, aunque abarcan grandes ángulos del cielo.

¿Puede reconstruirse el camino recorrido desde la homogeneidad hasta la rica diversidad de estructuras encontrada hoy día? Creemos que la ausencia de galaxias aisladas y la presencia de grandes vacíos pueden suministrar pruebas directas que nos permitan establecer los tiempos relativos de formación de galaxias, cúmulos de galaxias y cúmulos de cúmulos. Hay dos hipótesis rivales. El modelo que podríamos llamar más ortodoxo sugiere que las galaxias surgieron a partir de una especie de primitiva sopa casi homogénea. Pero el modelo se encuentra con una dificultad de peso: explicar cómo el universo efectuó su paso desde el estado inicial homogéneo hasta el estado en que la materia se agrupó para formar galaxias. Supone la hipótesis que, una vez constituidas las galaxias, las pequeñas irregularidades de distribución se irían abultando lentamente por efecto de las fuerzas gravitatorias de gran alcance. El resultado final de tal amplificación serían los supercúmulos que vemos hoy día.

La argumentación teórica rival fue esgrimida en 1972 por dos astrónomos rusos, Yakov Zel'dovich y Rashid Sunyaev. En su modelo, el gas del primitivo universo no se condensó inmediatamente en estrellas y galaxias. Irregularidades ligeras en la distribución general del gas, aunque a muy gran escala, fueron adquiriendo cada vez mayor entidad en respuesta a la atracción gravitatoria; consecuentemente, incrementaron progresivamente su carácter irregular. Con el tiempo, el gas se hizo suficientemente denso para agruparse en vastas capas de materia (apodadas "hojuelas"), que después se fragmentaron en galaxias. De acuerdo con esta hipótesis, los cúmulos y supercúmulos se formaron primero como condensaciones de gas; sólo entonces aparecieron las galaxias.

¿Apoyan nuestras observaciones de los supercúmulos alguno de esos dos modelos? Como el de Zel'dovich y Sunyaev requiere que todas las galaxias se hayan formado en cúmulos o supercúmulos, las galaxias de campo, o rezagadas aleatorias, debieron escasear. Si el modelo ortodoxo es correcto y las galaxias pueden formarse poco menos que en cualquier parte y al azar, para luego llegar, dirigidas por acción de la gravedad, hasta el "aprisco" del grupo o cúmulo, tendrían que menudear las galaxias dispersas. La verdad es que las únicas poblaciones de galaxias aisladas que hemos descubierto en nuestras exploraciones de corrimientos hacia el rojo son galaxias dispersas dentro de los límites de los supercúmulos. Además, los vacíos hacen honor a su nombre.

En nuestra opinión, las galaxias aisladas, dispersas por los supercúmulos, fueron otrora miembros de pequeños grupos deshechos luego por choques en el interior de los densos supercúmulos. Parece realista suponer que, en algún momento, todas las galaxias pertenecían a grupos o cúmulos. En suma, la distribución observada de las galaxias dentro de los supercúmulos y la existencia de enormes vacíos entre ellos concuerdan muy bien con el modelo de Zel'dovich y Sunyaev. Los partidarios del otro modelo están buscando ayuda en simulaciones de ordenador que esperan sirvan para mostrar cómo pequeñas irregularidades de pequeña escala pueden crecer hasta hacerse muy grandes mediante procesos aleatorios. No se ve claro por dónde pueda resolverse el debate.

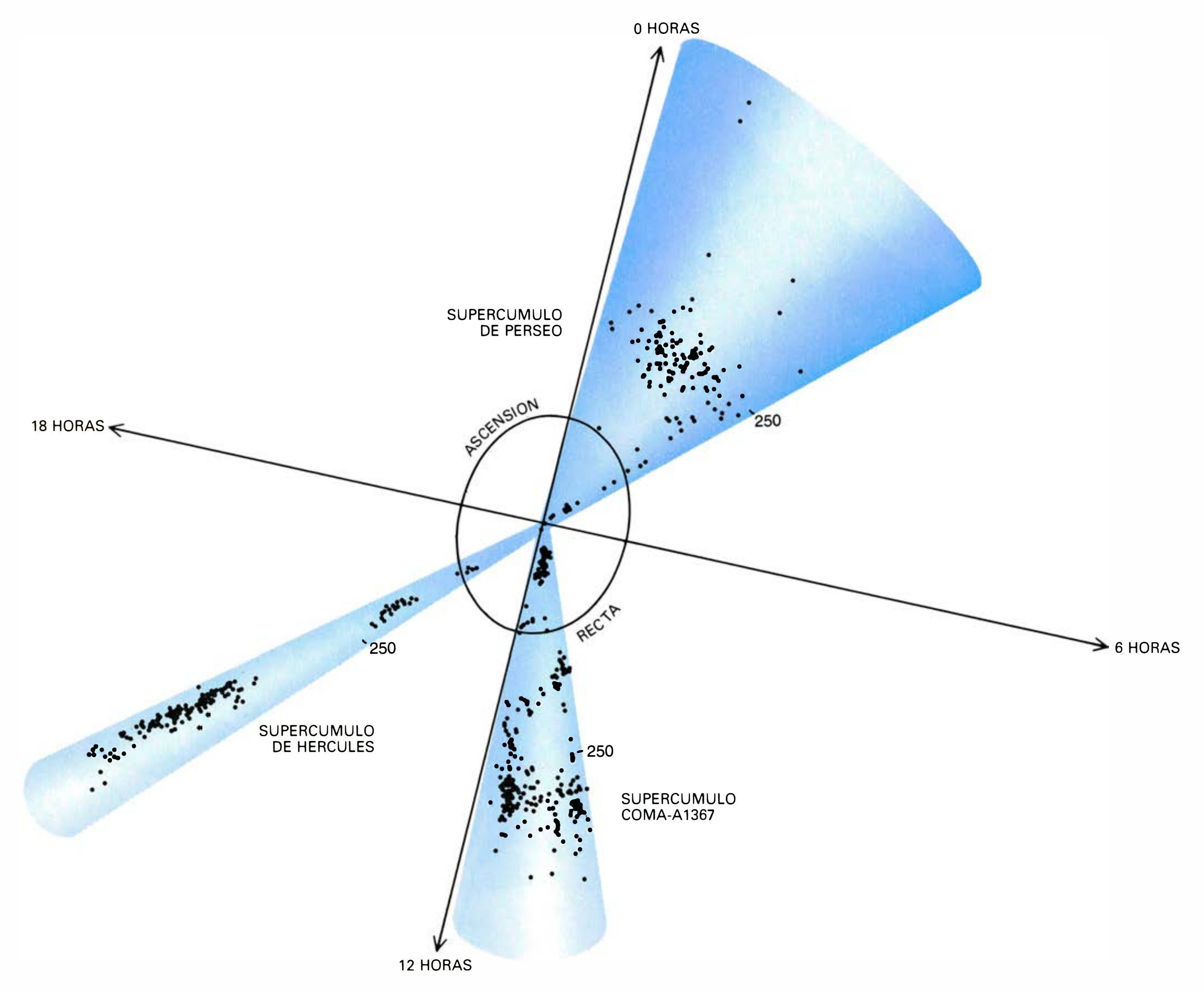
Al describir el supercúmulo filamentoso Perseo-Piscis sugeríamos la posibilidad de que los ejes de rotación de algunas galaxias guardaran correlación con los ejes de rotación de otras galaxias y también, plausiblemente, con la estructura global del supercúmulo filamentoso. La idea ha recibido respaldo reciente en un trabajo firmado por Mark T. Adams, Stephen E. Strom y Karen M. Strom, de Kitt Peak, quienes hallaron correlaciones rotacionales semejantes en los datos combinados de

varios cúmulos aplanados. Si tales correlaciones se confirman, los partidarios del modelo ortodoxo de formación de galaxias habrán de hacer frente a obstáculos insalvables en sus explicaciones. Los procesos estadísticos aleatorios del modelo tradicional no se prestan a generar movimiento rotatorio organizado en ninguna escala suficientemente grande. El modelo de Zel'dovich y Sunyaev, por el contrario, explicaría sin violencia alguna esas correlaciones.

¿Cuáles son las perspectivas respecto a la resolución de tales dificultades en el futuro próximo? Una de las líneas de investigación más prometedoras es la encaminada al mejoramiento continuado en la medida de la primitiva radiación de fondo en microondas. Las muy ligeras irregularidades observadas en esta radiación apuntan hacia la existencia de estructuras en el universo desde las épocas más tempranas. Los límites superiores de la homogeneidad observada son próximos a los límites necesarios para someter a prueba los dos modelos rivales de formación de galaxias. Tal vez los próximos diez años muestren que ninguno de los dos resulta satisfactorio, en cuyo caso los astrofísicos tendrán que volver a abordar el problema desde el principio.

Nuestros comentarios finales se refieren al propio concepto de supercúmulos de galaxias. En primer lugar, ¿es supercúmulo la palabra apropiada? Para muchos de nuestros colegas, el término debería restringirse a agregados que se mantienen unidos por la gravedad. Las observaciones no permiten decidir si se cumple o no esta condición. Nuestro propio punto de vista es que el ámbito de designación del supercúmulo se circunscribe a un agregado de galaxias presente en la actualidad y nítidamente separado de cualquier otra estructura similar. No se supone necesariamente que existan relaciones dinámicas entre los miembros de un supercúmulo.

Una segunda nota sobre la universalidad de los supercúmulos. Hemos establecido que cada cúmulo ricamente poblado del catálogo de Abell forma parte de un supercúmulo. Suponemos, por consiguiente, que una condición necesaria para la formación de un cúmulo rico es la presencia de cúmulos compañeros. Por último, quisiéramos dejarle al lector una idea clara de las dimensiones de los supercúmulos. El supercúmulo Coma-A1367 dista más de 300 millones de años-luz de nuestra galaxia y sin embargo, aun visto desde tamaña lejanía, se extiende por el cielo a lo largo de 20 grados a través de las constelaciones del Coma, de Berenice y Leo. Chincarini y Rood razonan, además, que el mismo supercúmulo podría ser hasta 10 veces mayor.



TRES DIRECCIONES EN EL CIELO, intensamente estudiadas en exploraciones de corrimiento hacia el rojo en galaxias. En esta proyección, el sistema solar está en el vértice de tres conos que abarcan las galaxias que se han explorado en cada una de las tres regiones donde se han identificado ya supercúmulos de galaxias. El indicador de escala adyacente a cada cono da la distancia desde el sistema solar en millones de años-luz. La escala toma en cuenta el acortamiento de la parte próxima de la proyección. Hasta ahora, sólo un 2 por ciento de la totalidad del cielo se ha explorado con semejante detalle.

La “visión” infrarroja de las serpientes

Serpientes de dos familias pueden detectar y localizar fuentes de radiación infrarroja. Las informaciones infrarroja y de luz visible se integran en el cerebro dando una perspectiva única y de amplio espectro del mundo

Eric A. Newman y Peter H. Hartline

Las serpientes de cascabel no fallan el golpe cuando se lanzan contra sus presas, ni siquiera de noche, en que la oscuridad las protege. El calor, es decir, la radiación infrarroja emitida por la víctima de sangre caliente, guía el ataque. La radiación es captada por un sistema extraordinario de que disponen las serpientes de cascabel para “ver” en una región del espectro electromagnético donde los animales generan su propia energía radiante.

Los “ojos” infrarrojos de la serpiente de cascabel son sus fosetas termosensibles, un par de cavidades profundas que se abren a los lados de la cabeza, por debajo y delante de los ojos. Las fosetas termosensibles están densamente inervadas por fibras sensibles al calor, que las conectan con el cerebro. Todas las serpientes de la subfamilia Crotalinae, víboras con foseta, tienen estos órganos y son sensibles a la radiación infrarroja. En Norteamérica, están representadas por la llamada boca de algodón (*Agkistrodon piscivorus,* mocasín de agua), la cabeza de cobre (*Agkistrodon contornix*) y la serpiente de cascabel. Pitones y otros muchos miembros de la familia Boidae (serpientes boidas), apartados relativamente de las crotalinas, poseen también fosetas termosensibles. A diferencia de las crotalinas, presentan muchas fosetas sobre las escamas que bordean su boca; hasta trece pares.

La sensibilidad infrarroja en crotalinas y serpientes boidas ha evolucionado, al parecer, a partir del sistema sensorial somático. En el hombre y otros mamíferos, dicho sistema sensorial está relacionado, entre otras, con las sensaciones táctiles, de presión, temperatura y dolor. En los mamíferos, la información recogida por la cara se transmite al cerebro por medio de la rama sensitiva del trigémino. En las serpientes con sensibilidad al infrarrojo, una porción importante del nervio trigémino se dedica a las fosetas termosensibles y a la percepción del infrarrojo. En el curso de la evolución, el sistema sensorial somático de crotalinas y boidas se ha ido conformando como un sentido semejante al de la visión. Crotalinas y serpientes boidas han desarrollado también núcleos, esto es, agrupaciones de células nerviosas, situados en el cerebro y especializados en recibir y procesar la información sensorial que procede de las fosetas termosensibles. Los núcleos proyectan la información al tectum óptico del cerebro medio, una estructura conocida por su papel en la visión y en la representación espacial de la información sensorial.

Como otros animales, los seres humanos aprenden a asociar varias modalidades sensoriales con objetos reales de diferentes clases. Por ejemplo, la visión de un ave y el sonido de su canto ayudan a localizarlo e identificarlo. Análogamente, el tectum óptico de las serpientes con sensibilidad infrarroja combina señales infrarrojas de las fosetas termosensibles con las señales visuales procedentes de los ojos. La integración de la información visual e infrarroja en el tectum proporciona a crotalinas y serpientes boidas un panorama único del mundo, una visión que compara y contrasta las imágenes visuales e infrarrojas.

A pesar de que las fosetas termosensibles fueron descritas por los anatomistas hace muchos años, su función permaneció sin descifrar hasta los años treinta, cuando G. Kingsley Noble y A. Schmidt, del Museo Americano de Historia Natural de Nueva York, demostraron que las fosetas detectaban el calor. Observaron que las serpientes de cascabel podían distinguir una bombilla eléctrica caliente (cubierta con una tela opaca) de otra fría. Las serpientes, si tenían libres las fosetas, se orientaban y atacaban a las bombillas calientes, pero cuando se las taponaba no prestaban atención ni a las calientes ni a las frías.

En los años 50, Theodore H. Bullock y sus colegas, de la Universidad de California en Los Angeles, demostraron que las fosetas termosensibles percibían las radiaciones infrarrojas emitidas por objetos calientes. Para ello registraron los impulsos nerviosos de los axones (largas fibras de las células nerviosas) del nervio trigémino, al que estaban conectadas las fosetas. Encontraron que un objeto caliente desencadenaba impulsos con igual eficacia tanto si se le presentaba a la serpiente de cascabel a plena luz como en cerrada oscuridad. Los axones no respondían si se exponía el mismo objeto una vez enfriado, aunque la habitación estuviera iluminada. Además, la actividad del axón en respuesta a un objeto caliente desaparecía si se intercalaba entre la foseta y el objeto un filtro de vidrio que absorbiera el calor, aunque el filtro dejara pasar casi toda la luz visible. En un experimento complementario se intercaló un filtro que no permitía el paso de la luz visible y sí dejaba pasar la mayor parte de la infrarroja; la respuesta sólo se reducía ligeramente. Quedó demostrado que la foseta termosensible captaba las radiaciones de longitudes de onda de infrarrojo.

¿Cuál es la agudeza del sentido infrarojo de la serpiente de cascabel? ¿Hasta dónde llega su precisión a la hora de localizar un objeto caliente? ¿Qué sensibilidad tienen los detectores infrarrojos? Las respuestas a estas preguntas se han obtenido a partir de experimentos mixtos de comportamiento y neurofisiológicos.



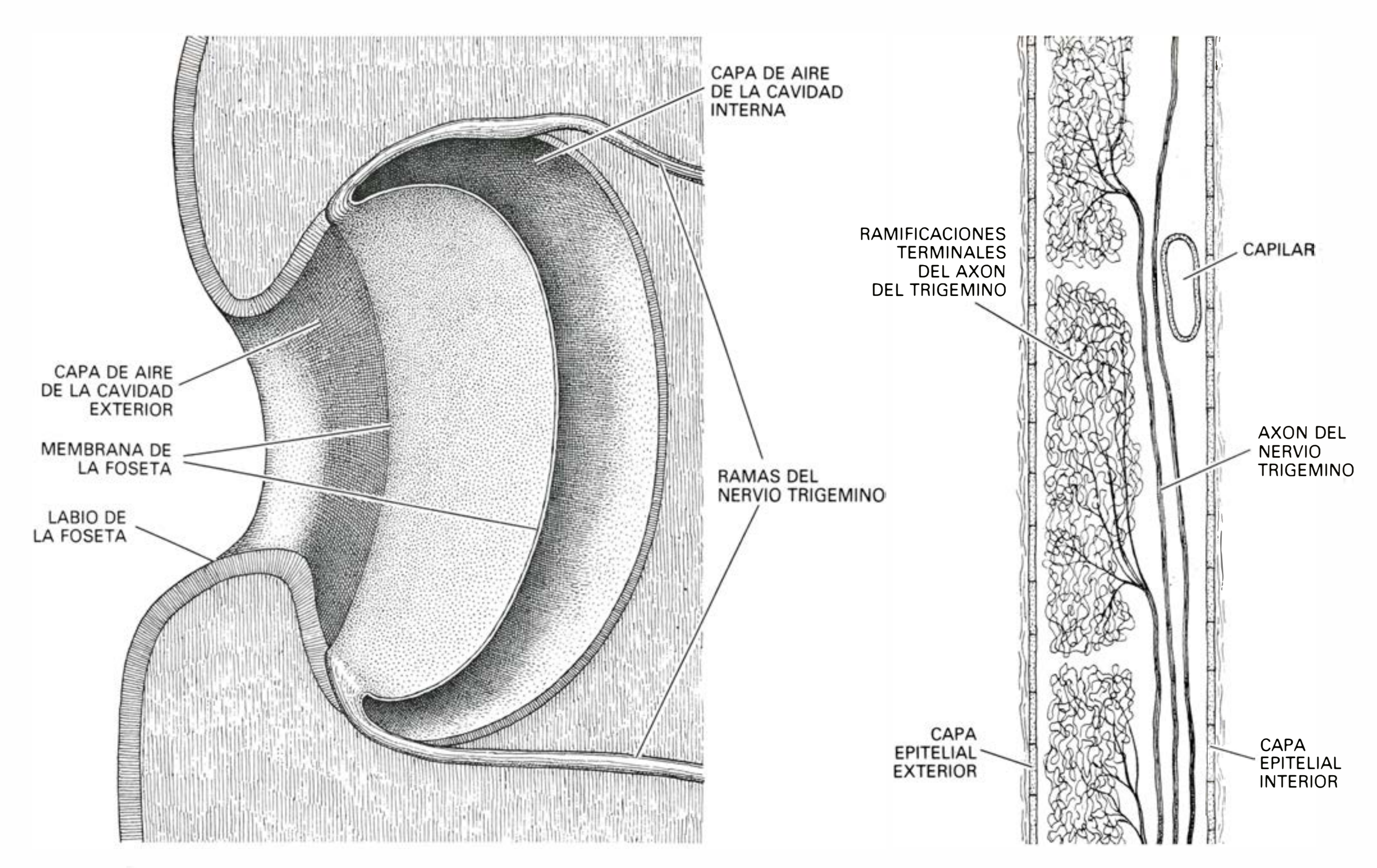
SERPIENTE DE CASCABEL del Pacífico meridional. Nativa del oeste de los Estados Unidos, puede localizar fuentes débiles de radiación infrarroja por medio de sus fosetas termosensibles, un par de cavidades situadas delante y debajo de sus ojos. En las serpientes de cascabel y otros miembros de la familia de las crotalinas, la radiación se detecta por una membrana sensible al calor, extremadamente delgada, que se extiende por todo el fondo de cada foseta. La membrana está densamente inervada por una rama del trigémino. El campo de recepción de cada foseta comprende desde 25 grados a un lado de la línea media del animal hasta 105 grados al otro lado y desde 45 grados por debajo de la horizontal hasta unos 60 grados por encima de la misma.



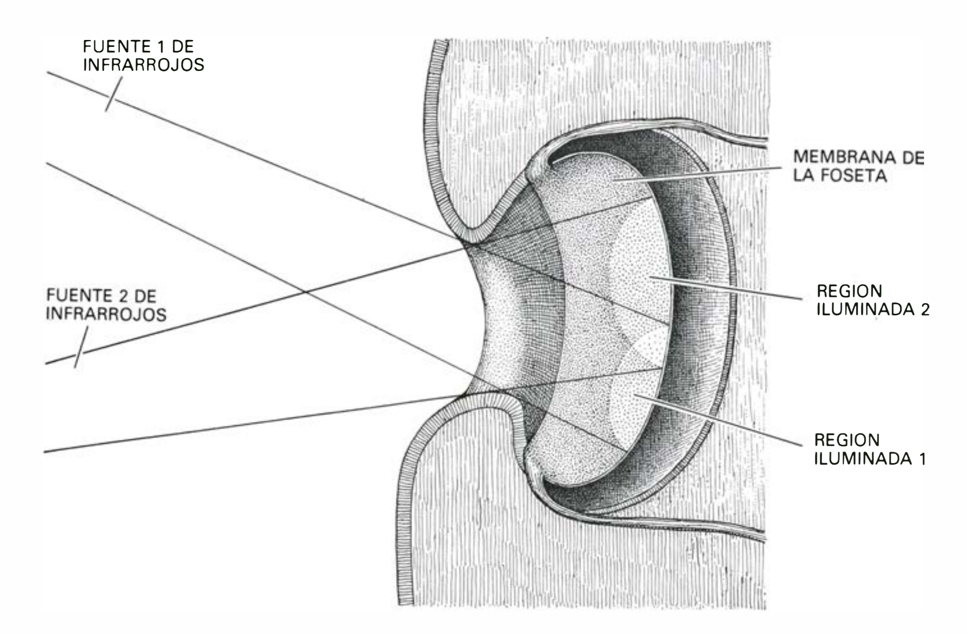
PITON RETICULADO, nativa de Asia meridional. Tiene 13 pares de fosetas en las escamas, por encima y debajo de su boca. La fotografía muestra cinco fosetas en el lado izquierdo del hocico y una en el derecho. Otras seis fosetas bordean el labio inferior, debajo y detrás de los ojos. Otras serpientes boidas (serpientes de la familia Boidae), entre las que se cuentan las boas arborícolas, tienen ordenaciones de fosetas similares. La superficie del fondo de cada foseta es muy sensible a la energía calorífica. Cada foseta tiene un campo de recepción ligeramente diferente. Otras boidas, la boa constrictor incluida, carecen de fosetas propiamente dichas; pero poseen en su cara escamas sensibles al infrarrojo. Las dos fotografías son de Newman, uno de los autores.

CEREBRO POSTERIOR
TECTUM OPTICO
CEREBELO
MEDULA ESPINAL
CEREBRO ANTERIOR
NUCLEO DEL TRACTO DESCENDENTE LATERAL (LTTD)
FOSETA TERMOSENSIBLE
OJO
NERVIO OPTICO
RAMA DEL NERVIO TRIGEMINO

ESTRUCTURAS CEREBRALES y vías nerviosas relacionadas con el sistema sensorial infrarrojo de las crotalinas. Las conocemos sólo desde hace poco. Una cuestión intrigante, ahora ya resuelta, era la de cómo llega la información que se recoge en fosetas termosensibles, y se transmite por impulsos a través del nervio trigémino, hasta el tectum óptico, estructura del cerebro medio que desempeña un importante papel en el procesamiento de la visión.



FOSETA TERMOSENSIBLE de la serpiente de cascabel. Así se llama a la cavidad que se abre en tejidos blandos y hueso de la cara (*izquierda*). Una membrana sensible al calor, de unos 30 milímetros cuadrados de superficie por 15 micrometros de espesor, se extiende por toda la cavidad. La membrana intercepta la radiación infrarroja que atraviesa la abertura de la foseta. En el interior de la membrana de la foseta (*derecha*), las espesas terminaciones nerviosas de las fibras del nervio trigémino finalizan a pocos micrometros de la superficie externa de la membrana. Basta un cambio en la temperatura de la membrana de 0,003 grados Celsius para elevar la frecuencia de impulsos. Se desconoce aún el mecanismo biofísico que subyace a la respuesta al calor.



OPTICA DE LA FOSETA TERMOSENSIBLE, que recuerda la de una cámara oscura con orificio angosto. El diámetro de la abertura de la foseta en una serpiente de cascabel ronda los dos milímetros, un tercio, aproximadamente, del diámetro de la membrana sensible al calor. La radiación procedente de una fuente infrarroja sólo iluminará, por tanto, el área de membrana que corresponda a un cono definido por la ubicación de la fuente y la abertura de la foseta. La precisión del sistema no hallará otra limitación, pues, que la impuesta por la capacidad de la serpiente para localizar los bordes de la región iluminada.

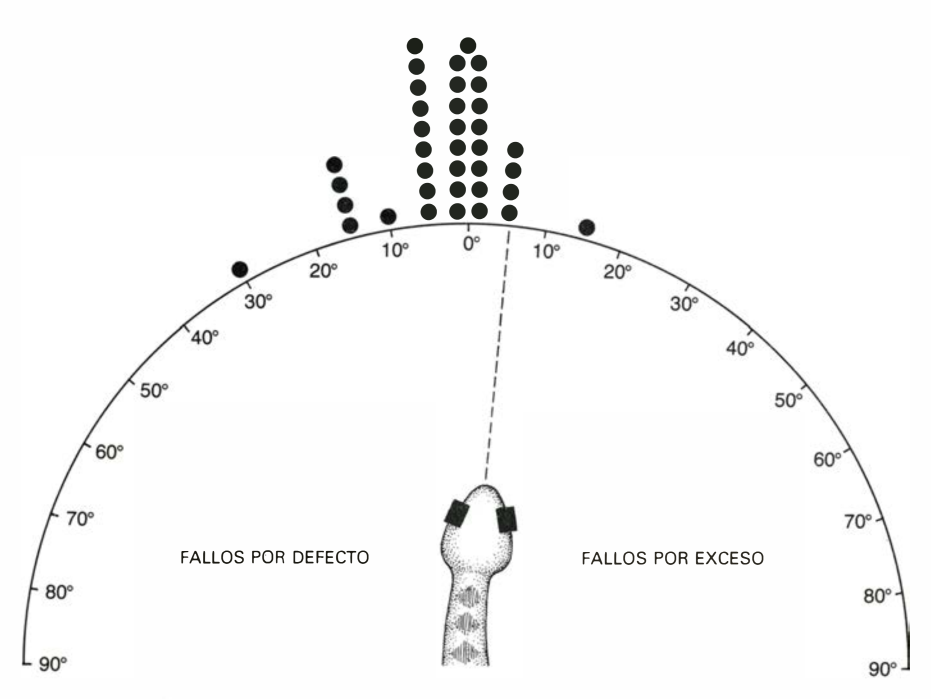
Para determinar el grado de exactitud con que una serpiente de cascabel localiza un objeto caliente, Laurence R. Stanford y Michael S. Loop, trabajando con uno de nosotros (Hartline) en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, midieron la precisión del ataque de serpientes con los ojos vendados. Se colocó un reptil con los ojos tapados (pero no las fosetas) sobre un pedestal elevado en medio de un recinto circular. Se le presentó al animal, fuera de su alcance de ataque, una fuente de infrarrojo (la punta caliente de un soldador). Un experimentador presentaba el soldador a varios ángulos, desde cero a 60 grados, a la izquierda o a la derecha de donde la serpiente estaba encarada. Había una cámara de vídeo lista para el registro de los ataques esperados, cuya exactitud se mediría en la posterior proyección de la cinta de vídeo.

Las serpientes se negaron a cooperar. Casi nunca atacaban al soldador, quizá porque el estímulo no les fuera suficientemente significativo. La solución, un tanto diabólica, fue aplicar al reptil un shock eléctrico suave justo antes de cada presentación del soldador. Las serpientes atacaron entonces con bastante frecuencia, lo que permitió medir la precisión de sus respuestas. Incluso con ambos ojos cubiertos, los golpes asestados fueron precisos, con errores de menos de cinco grados angulares, se hallara el blanco en línea recta con la cabeza o a un lado u otro. El hecho es bastante impresionante y, para un ratón, mortal.

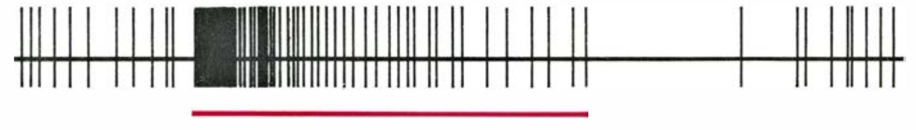
¿Cómo puede un investigador medir la sensibilidad del sentido infrarrojo? El método seguido por Bullock consistió en registrar, en los axones del nervio trigémino, la frecuencia de potenciales de acción, impulsos nerviosos, que salían de la foseta termosensible. Esta aproximación neurofisiológica podía informar de la sensibilidad del receptor de foseta. Bullock encontró que, en ausencia de estímulo, los axones transmitían una descarga irregular de potenciales de acción de baja frecuencia. Cuando la foseta se iluminaba bruscamente con radiación infrarroja de moderada intensidad, la frecuencia de descargas se incrementaba espectacularmente. La elevación de la frecuencia ocurría a los 100 milisegundos del comienzo del estímulo, se mantenía elevada durante un breve lapso y decaía luego lentamente hasta casi el nivel de base. Al cesar la iluminación, la frecuencia de descargas descendía temporalmente por debajo del nivel de base para, lentamente, recuperar luego la frecuencia pre-estimular.

Bullock y sus colegas hallaron que los distintos axones se mostraban extraordinariamente sensibles a los estímulos infrarrojos. Un cuerpo pequeño caliente, así una mano humana o una rata viva, colocado a metro y medio de la foseta desencadenaba un incremento apreciable en la frecuencia de descargas de algunas fibras nerviosas del trigémino. Tal estímulo correspondía a un incremento de la energía incidente sobre la foseta termosensible de aproximadamente 0,1 miliwatt por centímetro cuadrado. Valga de comparación que en un día claro de invierno, a una latitud de unos 45 grados Norte, los rayos del sol liberan unos 50 miliwatt de energía infrarroja por centímetro cuadrado.

Bullock y F. P. J. Diecke realizaron



PRECISION ESPACIAL del sistema infrarrojo de la serpiente de cascabel. Puede medirse presentando objetos calientes a varios ángulos, a la izquierda o a la derecha de la serpiente, tapando los ojos del reptil con anteojeras. Cada círculo negro representa un ataque de la serpiente y muestra el error angular entre el ataque y el blanco. El estímulo se presentó hasta 60 grados a la izquierda o a la derecha del animal. El error promedio de los ataques alcanzó los cinco grados angulares. (Los dibujos son de Tom Prentiss.)



LAS FIBRAS DEL NERVIO TRIGEMINO señalan los cambios térmicos de la membrana de la foseta de la serpiente de cascabel. La línea coloreada indica un período de ensayo de 10 segundos, durante el cual la foseta termosensible de la serpiente se expuso a la radiación infrarroja. La frecuencia de potenciales es máxima cuando incide la radiación, pero decae seguidamente casi hasta el nivel de base. Al cesar la radiación hay un corto período de silencio. Las propiedades de las fibras trigéminas infrarrojas fueron descubiertas por Theodore H. Bullock y sus colegas, de la Universidad de California en Los Angeles.

también mediciones directas de la sensibilidad a la temperatura de fibras terminales del trigémino de la foseta de la serpiente de cascabel. Controlaron la temperatura interna de la foseta por medio de una corriente de agua caliente introducida en la cavidad de dicha foseta. Un cambio en la temperatura del flujo de agua de tan sólo 0,003 grados Celsius produjo un cambio apreciable en la frecuencia de descarga en las fibras nerviosas más sensibles.

La notable sensibilidad de las fosetas al calor radiante se debe a su peculiar estructura. Las fosetas de una serpiente de cascabel o serpiente boida forman una cavidad de uno a cinco milímetros de diámetro en el tejido blando y en el hueso de la cabeza. En las serpientes de cascabel se suspende, por todo el espacio lleno de aire de la cavidad, una fina membrana de unos 30 milímetros cuadrados de superficie. Tiene sólo 15 micrometros de grosor, es decir, más o menos la cuarta parte del espesor de esta página; constituye el componente principal del órgano sensible. Distribuidas por la superficie de la membrana hay unas 7000 terminaciones termosensitivas de axones del trigémino. Cada terminal puede excitar su fibra nerviosa cuando se calienta. Similares terminaciones nerviosas sensibles al calor cubren el fondo de cada foseta en las serpientes boidas. En los boidos, el epitelio sensitivo no está suspendido en el aire, como en las serpientes de cascabel. Las terminaciones del axón, sin embargo, están ubicadas a 30 micrometros de la superficie.

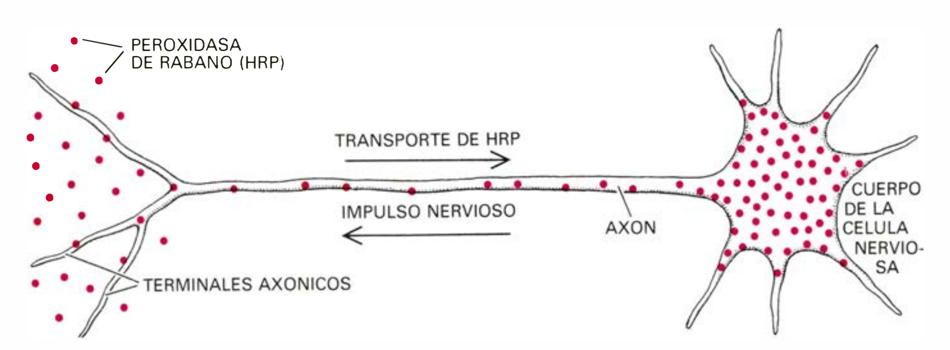
La extrema sensibilidad al calor de las fosetas termosensibles es resultado directo de la proximidad de los termoreceptores a la cara exterior del epitelio sensible. La radiación infrarroja que incide sobre la superficie eleva inmediatamente la temperatura de los sensores. Si la misma cantidad de radiación incidiera sobre la piel afeitada de un mamífero elevaría la temperatura de los primeros micrometros a un valor semejante. Sin embargo, los termorreceptores de los mamíferos se encuentran mucho más profundos; debe calentarse todo el tejido que media entre la superficie y los receptores, alrededor de 300 micrometros, lo que requiere unas 20 veces más energía calorífica que la necesaria para calentar la citada membrana de 15 micrometros de espesor. Además, la sensibilidad de los receptores de los mamíferos se reduce posteriormente por pérdidas caloríficas de conductividad en la nivelación de la temperatura en capas más profundas. Las serpientes de cascabel evitan este problema con una nueva especialización; puesto que la membrana sensible al calor está rodeada por aire a ambos lados, no hay pérdidas de calor en tejidos más profundos; la energía absorbida de la radiación infrarroja calienta casi exclusivamente a los receptores.

Aunque la sensibilidad a la temperatura por parte de los axones del nervio trigémino de la serpiente de cascabel es impresionante, no es nada fuera de lo común si se compara con las células nerviosas termosensibles de otros animales. La piel de la frente humana, por ejemplo, tiene aproximadamente el mismo umbral de sensibilidad a la temperatura. La gran diferencia entre las serpientes de cascabel y otros animales en cuanto a la sensibilidad a radiaciones incidentes se debe, principalmente, a especializaciones anatómicas del órgano sensorial y no a diferencias fisiológicas de los receptores.

La competencia direccional del sentido infrarrojo puede atribuirse también a especializaciones anatómicas de la foseta. Las fosetas de las serpientes de cascabel tienen aberturas de menos de la mitad del diámetro de la superficie sensorial. Así, un pequeño objeto calentado, a metro y medio aproximadamente de la foseta, no iluminará más que una cuarta parte de toda la membrana termosensible. La localización del área iluminada sobre la superficie de la membrana daría, por tanto, una pista válida para localizar el objeto caliente. En resumen, las funciones de la foseta recuerdan las de una cámara oscura con un pequeño orificio para la entrada de la luz.

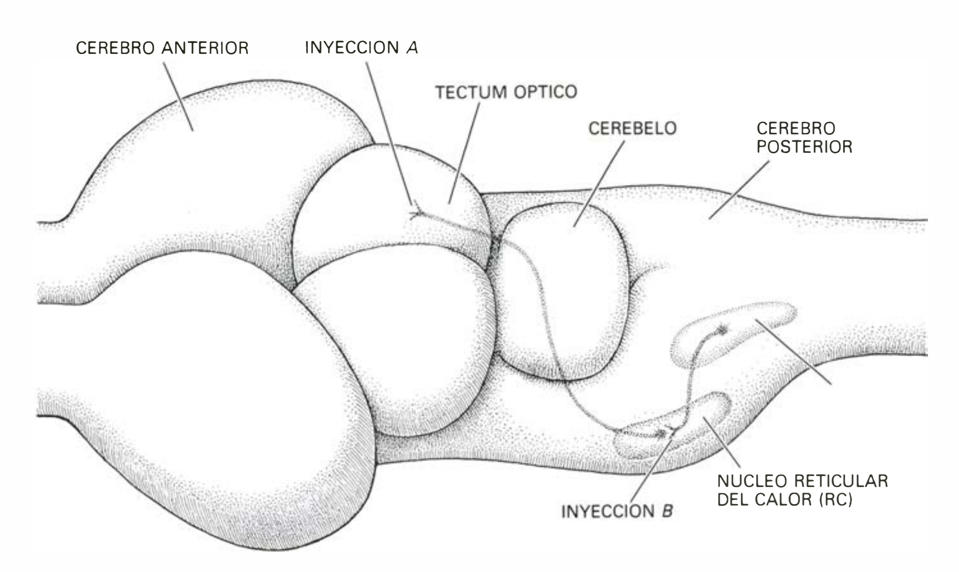
La exactitud con que la serpiente sitúa un objeto caliente depende de la precisión con que determina el área iluminada sobre la membrana. Cálculos trigonométricos simples demuestran que, para localizar una fuente pequeña con un ángulo de alrededor de cinco grados, la serpiente debe determinar la posición del área de calor proyectada sobre la membrana con una exactitud de 175 micrometros. Con un mosaico de receptores, cada uno de alrededor de 60 micrometros de diámetro, tal exactitud es del todo razonable. La difracción de la radiación infrarroja (que comprende longitudes de onda entre 6 y 12 micrometros) puede difuminar en cierto modo los bordes del área de calor sobre la membrana, pero no hasta el punto de reducir significativamente la exactitud de la foseta.

Las especializaciones desarrolladas por las serpientes sensibles al infrarrojo no se limitan a la foseta termosensible. Crotalinas y serpientes boidas han desarrollado también ciertas estructuras cerebrales para procesar la nueva información recopilada por las fosetas. Los primeros experimentos neurofisiológicos sobre el cerebro de serpientes de cascabel demostraron que la actividad



VIA ANATOMICA DEL SISTEMA INFRARROJO, descubierta con la ayuda de un enzima extraído del rábano picante, la peroxidasa de rábano (HRP). Captada por los terminales de las neuronas, la HRP se transporta hasta los cuerpos celulares. Las moléculas de HRP se simbolizan por puntos de color.

de muchas neuronas del tectum óptico del cerebro medio (que por entonces se suponía relacionado sólo con la visión) estaba controlada por estímulos infrarrojos. Evidentemente, el sistema infrarrojo, en paralelo con su evolución desde sensor cutáneo hasta sensor remoto análogo a la visión, ha alcanzado una representación prominente en el tectum. Este descubrimiento, logrado independientemente por uno de nosotros (Hartline), a la sazón en la Universidad de California en San Diego, y por S.-I. Terashima y R. C. Goris, de la Facultad de Medicina y Odontología de la Universidad de Tokyo, presentó un problema anatómico interesante. En otros reptiles, y en los mamíferos, el nervio trigémino termina en la región trigémina del cerebro posterior. ¿Cómo llega la información infrarroja que parte del nervio trigémino hasta el tectum óptico del cerebro medio en las serpientes de cascabel?



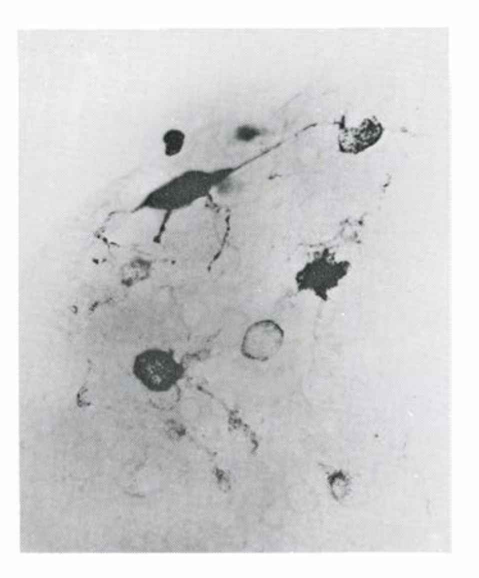
PEROXIDASA DE RABANO INYECTADA EN EL CEREBRO de una serpiente de cascabel. Se detectó su rastro tiñendo cortes finos de tejido. La peroxidasa inyectada en el tectum óptico (*A*) se desplazó hasta un núcleo, reunión de cuerpos celulares, hasta entonces desconocido, el núcleo reticular del calor (RC). Cuando se inyectó HRP en ese núcleo (*B*), se encontraron cuerpos celulares teñidos en el núcleo LTTD, del que se sabía que recibía información directa de la foseta termosensible. LTTD responde a una expresión latina que se traduce por núcleo del tracto trigémino descendente lateral. Los experimentos con HRP resuelven el enigma de cómo la información infrarroja que se origina en la foseta termosensible de la serpiente de cascabel alcanza en último extremo el tectum óptico, colículo superior en los mamíferos.

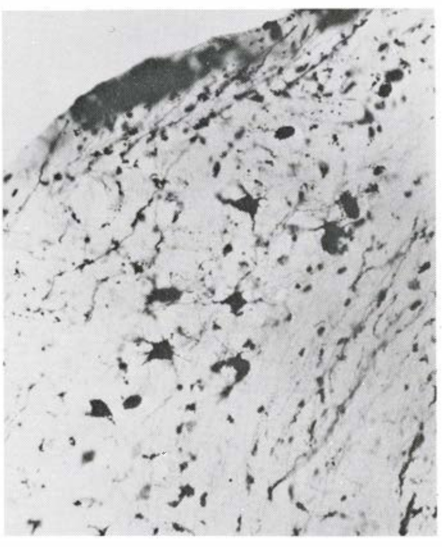
Dos grupos de investigadores comenzaron a trabajar sobre el problema. Dolores M. Schroeder y Loop, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Virginia, emplearon iones cobalto para seguir la pista de las conexiones del nervio trigémino de la serpiente de cascabel. Colocaron la porción final de una rama del nervio que inerva la foseta en una solución de cloruro de cobalto y pasaron una corriente eléctrica entre la solución y el cerebro. La corriente condujo los iones de cobalto por los axones del nervio hasta los terminales axónicos. Cuando Schroeder y Loop trataron secciones de cerebro con un colorante del cobalto, encontraron que las fibras del nervio trigémino no terminaban en el área normal trigémina del cerebro posterior, sino en un nuevo núcleo, conocido hoy por LTTD (abreviatura de la nueva estructura, cuya designación latina original rezaba: "núcleo del tracto descendente lateral del trigémino").

G. J. Molenaar, de la Universidad de Leiden, identificó por su parte lo que casi con certeza corresponde al mismo núcleo en el pitón, una serpiente boida. El núcleo LTTD parece exclusivo de las serpientes dotadas para captar el infrarrojo; no se ha encontrado en ningún otro animal. Cabría decir, pues, que está exclusivamente dedicado al sistema sensorial infrarrojo.

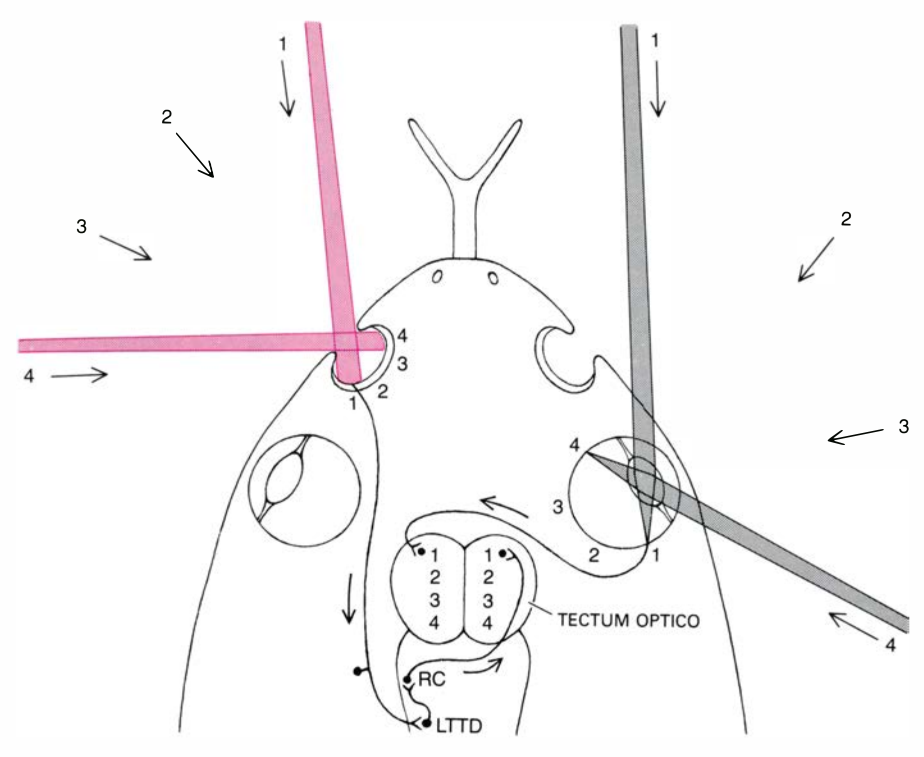
Este hallazgo picó nuestra curiosidad. Si los impulsos nerviosos conducidos por los axones trigéminos se liberaban al núcleo LTTD ¿cuál era el camino que conducía la información sensorial al tectum óptico? Un método apropiado para seguir las conexiones a nivel del cerebro era usar el enzima peroxidasa extraído del rábano picante. La macromolécula de esta peroxidasa se captaba específicamente en los terminales axónicos de las neuronas individuales y se transportaba a otras partes de las mismas células. Tiñendo la preparación se visualizaba la peroxidasa de rábano y se revelaba la localización de los cuerpos celulares de las neuronas que habían captado la peroxidasa.

En colaboración con Edward R. Gruberg, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y Earl Kicliter, de la Universidad de Puerto Rico, inyectamos peroxidasa de rábano a niveles profundos del tectum óptico de la serpiente de cascabel, donde se registraba la sensibilidad infrarroja. Si las células del LTTD se proyectaban directamente al tectum óptico, pensábamos, sus terminales axónicos en el tectum recogerían la peroxidasa y la devolverían al LTTD. Con sorpresa observamos que no se teñían las neuronas del LTTD; descubrimos, en cambio, un grupo de

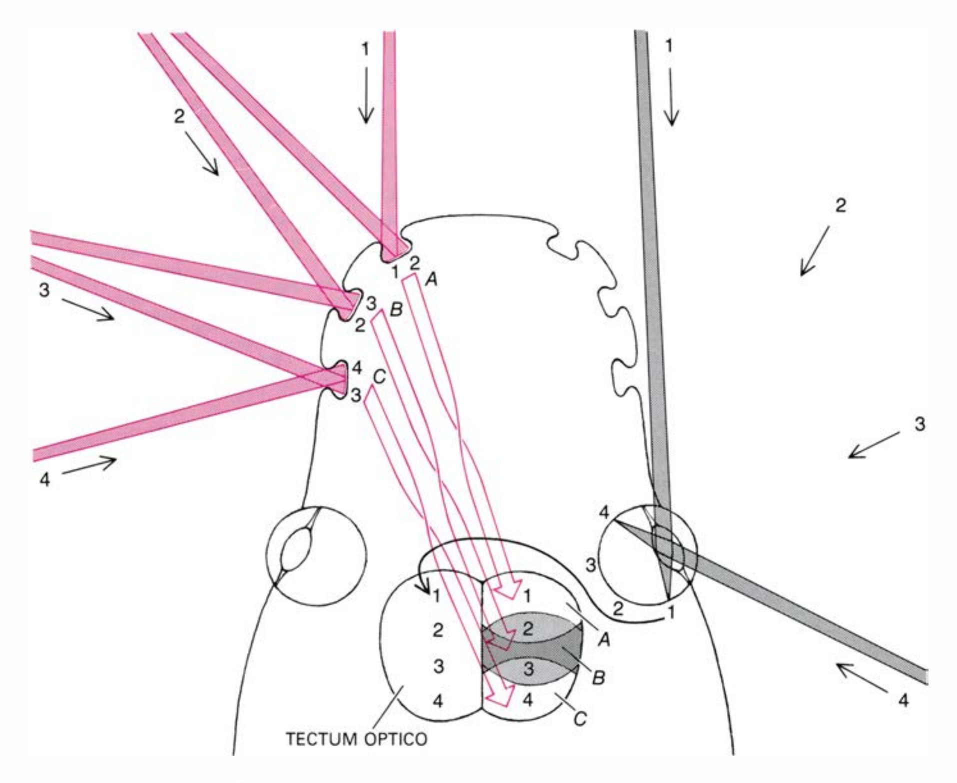




MICROGRAFIAS DE CORTES CEREBRALES. Tras la tinción, los cuerpos celulares marcados con HRP se destacan en negro, con perfiles irregulares. La microfotografía de la izquierda es una sección del núcleo reticular del calor, RC, después de inyectar peroxidasa de rábano en el tectum óptico. La micrografía de la derecha es una sección del núcleo LTTD, una vez inyectado el enzima en el núcleo RC. Los experimentos fueron realizados por los autores y Edward R. Gruberg, del Instituto de Tecnología de Massachusetts. En un primer experimento colaboró Earl Kicliter, de la Universidad de Puerto Rico.



ESPACIO INFRARROJO Y ESPACIO VISUAL, representados en orientaciones similares sobre la superficie del tectum óptico de la serpiente de cascabel. Para mayor claridad, las vías nerviosas de los dos sistemas sensoriales aparecen en lados opuestos de la cabeza. El área frontal del tectum (*1*) recibe las fibras procedentes de las áreas posteriores de la membrana de la foseta y de la retina, cuyas superficies reconocen aproximadamente las mismas regiones del espacio. El área posterior del tectum óptico (*4*) recibe la entrada de las áreas frontales de la foseta y la retina, que "miran" a un lado y atrás del propio animal. Aunque las representaciones de los campos infrarrojo y visual de la panorámica sobre la superficie del tectum óptico muestran ciertas diferencias sistemáticas, son lo bastante similares para que cada región del tectum óptico reciba información de una misma región del espacio a través de ambos sentidos.



CABLEADO DEL SISTEMA INFRARROJO DEL PITON. Constituye una red de conexiones más compleja que la de la serpiente de cascabel. Las fosetas termosensibles del pitón rastrean áreas del espacio infrarrojo diferentes, aunque solapadas. (Solamente se representan aquí tres de las fosetas.) La amplitud de campo de cada foseta queda representada sobre la región de proyección de la superficie tectal. Las fosetas anteriores (*A*) se proyectan en la parte frontal del tectum, las fosetas posteriores (*C*) hacia la parte caudal del tectum. El área frontal de cada epitelio sensible al infrarrojo de las fosetas queda conectado a una región posterior de proyección. El complejo patrón de conexiones produce una representación más o menos continua del espacio infrarrojo, que se corresponde bastante bien con la representación visual.

células fuertemente teñidas en una región del cerebro posterior. Postulamos que este grupo de células, a las que llamamos núcleo reticular del calor (RC), debía actuar de estación de relevo entre el LTTD y el tectum.

Había que determinar, llegados a ese punto, si nuestro núcleo estaba directamente conectado al LTTD. La investigación contó con la ayuda de Gruberg; inyectamos peroxidasa de rábano en el núcleo RC; esta vez sí encontramos células teñidas en el LTTD. Stanford y Schroeder ensayaron en el mismo sentido con una técnica basada en la degeneración de células nerviosas. Destruyeron selectivamente células del núcleo LTTD de la serpiente de cascabel y utilizaron un procedimiento de tinción que ponía de manifiesto la degeneración de los axones de estas células. Lograron seguir los axones desde LTTD hasta RC. Ambas técnicas experimentales dieron la misma respuesta: las células del núcleo LTTD se proyectaban directamente sobre el núcleo RC. Aunque ninguno de estos experimentos puso en claro qué papel funcional desempeñaban los núcleos LTTD y RC en el sistema sensorial infrarrojo, sí se desveló cómo llegaba al tectum óptico la información infrarroja. En la serpiente de cascabel, los núcleos LTTD y RC intervenían en el procesamiento de la información sensorial infrarroja y la transmitían al tectum.

La eficacia del sistema infrarrojo como guía de la acometida de la serpiente no permite dudar de la capacidad del sistema para localizar objetos en el espacio con gran precisión. Su función es comparable con la que realiza el sistema visual en otros animales. Estudios neurofisiológicos de nuestros colegas y los nuestros propios han puesto de manifiesto numerosas semejanzas entre el mecanismo que utilizan los sistemas visual e infrarrojo para localizar objetos.

Bullock, y más tarde J. A. DeSalvo, trabajando con uno de nosotros (Hartline), describió que los distintos axones del nervio trigémino respondían de forma individual a los estímulos de calor localizados en cualquier punto de un campo de inspección descrito por un cono cuyo vértice partía de la foseta. Tales conos de inspección, normalmente de 45 a 60 grados de amplitud, se llaman campos receptivos excitadores, por analogía con los campos visuales. Así, la mayoría de las fibras trigéminas se comporta como si sus campos receptivos estuvieran limitados, simplemente, por las sombras proyectadas por el

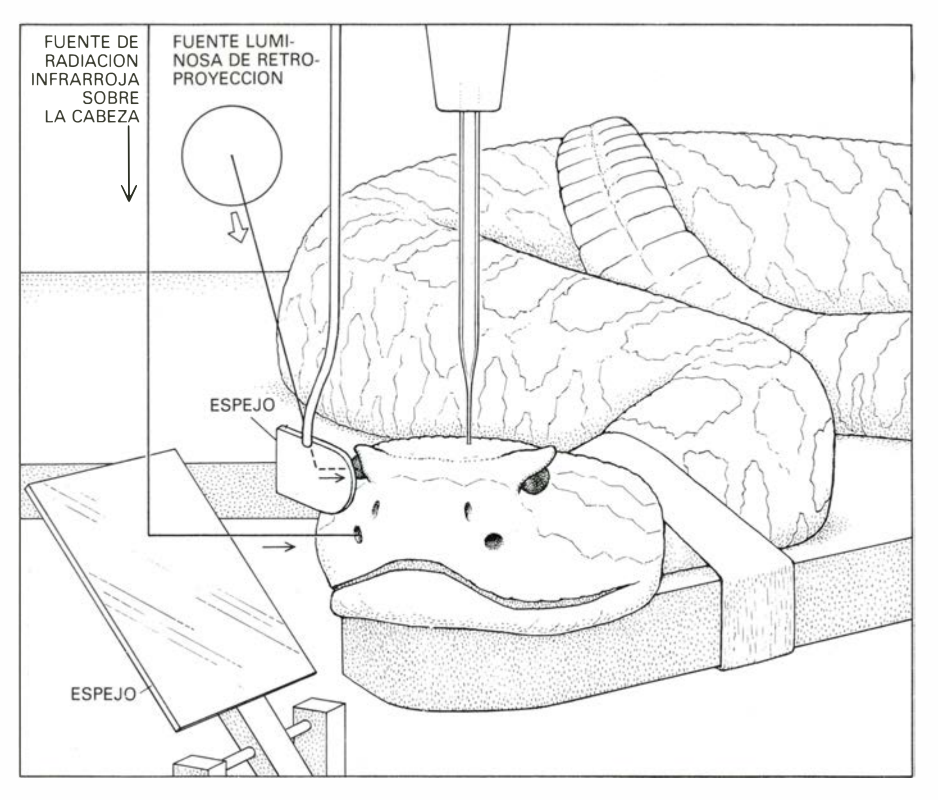
labio de la foseta sobre su membrana. La respuesta de una sola neurona trigémina no transmitiría con exactitud la localización del estímulo, pero sí lo haría una población de muchas neuronas cuya actividad analizara el cerebro. En tal análisis, el tectum óptico desempeña, sin duda, un importante papel.

El tectum óptico, también conocido en los mamíferos como colículo superior, es uno de los principales centros visuales del cerebro, quizás el de mayor rango a la hora de procesar la información y localizar los objetos en el espacio. En los simios, el tectum ayuda a la fijación de la mirada y, en las ranas y sapos, probablemente inicia y controla la captura de insectos y otras presas.

En el tectum óptico, la información visual se organiza espacialmente. Las conexiones entre la retina y el tectum están dispuestas de forma que en la superficie de éste se origine un mapa del espacio visual. Análogamente a como un mapa de carreteras representa la organización espacial de la red viaria de un territorio, el mapa visual que se forma sobre la superficie tectal representa el espacio que capta el ojo. La parte anterior del tectum representa la parte de espacio visual que está frente al animal; la parte posterior del tectum corresponde al espacio visual lateral y posterior del animal. Esta representación espacial de la visión en el tectum constituye una característica constante de los vertebrados, desde los peces hasta los primates.

La visión no es el único sentido que puede informar al cerebro de la posición de los objetos, también el sonido proporciona valores indicativos para la localización, así como el tacto. Ambos están representados en el tectum óptico de los mamíferos. Además, el sistema auditivo y el sensorial somático están representados en el tectum con orden espacial y coinciden sensiblemente con el mapa tectal del sistema visual. La parte frontal del tectum representa la región frontal del espacio auditivo; los sonidos que llegan de la parte frontal de un animal excitan preferentemente la parte anterior del tectum. Análogamente, la parte frontal del tectum responde a los estímulos táctiles de las partes anteriores del animal, como es el hocico.

¿Se organiza el sistema infrarrojo de una forma espacial similar en el tectum óptico de la serpiente de cascabel? Leonard J. Kass, Loop y uno de nosotros (Hartline) estudiaron el tema, en la Universidad de Illinois, recurriendo a técnicas neurofisiológicas. Se re-



SENTIDO VISUAL Y SENTIDO INFRARROJO de la serpiente de cascabel. Uno y otro fueron objeto de estimulación con un equipo especial en el laboratorio de los autores del Eye Research Institute of the Retina Foundation de Boston, Massachusetts. El microelectrodo inserto en la parte superior de la cabeza de la serpiente registraba cada vez la actividad de una célula tectal. La radiación infrarroja procedente de una fuente directa colocada por encima de la serpiente se reflejaba en un espejo de inclinación variable, dispuesto de tal suerte que la radiación incidiera sobre la foseta derecha. Las imágenes visuales, que partían de un retro-proyector, se dirigían hacia el ojo derecho mediante un espejo de menor tamaño.

gistraron las respuestas eléctricas de las células sobre la superficie tectal y se determinaron los puntos espaciales para los que un estímulo infrarrojo evocaba una respuesta neuronal máxima.

Analizados los datos obtenidos de varias serpientes, comprobamos que no sólo el sentido infrarrojo se organizaba espacialmente en el tectum: el mapa tectal infrarrojo seguía las mismas reglas que el visual. La parte frontal del tectum respondía a los estímulos infrarrojos que llegaban de la parte frontal de las serpientes y, la parte posterior, a estímulos que procedían de los lados. En resumen, los mapas visual e infrarrojo, en una primera aproximación, aparecían solapados en el tectum. Como veremos, la similitud de la organización espacial de los sistemas visual e infrarrojo ofrece ventajas en el procesamiento de señales procedentes de las dos modalidades sensoriales.

La orientación del mapa del espacio infrarrojo sobre el tectum representa una desviación fundamental respecto del patrón general de conexiones que caracteriza al sistema sensorial somático de los vertebrados, aun cuando el sistema infrarrojo presumiblemente proceda, por evolución, de algún sentido somático. En casi todos los otros animales, la parte anterior del tectum representa la parte frontal del animal; sin embargo, en las serpientes de cascabel, la parte frontal del tectum se corresponde con la zona de la membrana de la foseta más alejada del hocico. Estas conexiones invertidas conservan en el tectum la representación normal del espacio, pero no en lo que se refiere a la información de la superficie del cuerpo.

Las serpientes boidas constituyen un ejemplo todavía más complejo de conexiones entre la piel y el tectum. El pitón reticulado, por ejemplo, tiene 13 fosetas a cada lado de la cabeza. Cada foseta es, en esencia, un sistema óptico invertido que evoca un mapa tectal, también invertido, como el de la serpiente de cascabel. Sin embargo, las fosetas frontales de la cabeza del pitón reciben también mayor información frontal que las situadas detrás. Cabría esperar, pues, que las fosetas frontales estuvieran conectadas a la parte frontal del tectum, conforme al esquema de no inversión de los vertebrados. ¿Cómo puede, pues, conectarse la hilera de fosetas al tectum para formar una representación razonable del espacio infarrojo? E .C Haseltine, de la Universidad de Indiana, abordó este intrincado problema en colaboración con uno de nosotros (Hartline).

Y lo que nos encontramos fue el esquema de conexiones somáticas más complejo observado en un animal hasta la fecha. Primero localizamos la región del tectum que recibía conexiones de toda la superficie sensible de una foseta aislada, o sea, la región de proyección de la foseta. Al localizar la proyección tectal de una foseta observamos que la parte frontal de cada foseta se correspondía en el tectum con la parte más posterior. La representación de cada foseta estaba, por tanto, invertida en comparación con los mapas somáticos de los vertebrados típicos. Cuando se compararon las regiones de proyección de las diferentes fosetas encontramos que el esquema somático de los vertebrados se mantenía: la proyección de las fosetas frontales iba al tectum frontal y la proyección de las fosetas más caudales a regiones postreras del tectum. No acaba ahí la complejidad: las fosetas adyacentes, cuyos campos de infrarrojo se solapan sustancialmente, producen también regiones de proyección solapada en el tectum.

El resultado final es una representación simple y coherente del espacio infrarrojo sobre la superficie tectal del pitón. Y lo que es más importante: los mapas visual e infrarrojo del pitón se corresponden sensiblemente entre sí. Una intrincada reorganización de las conexiones entre el sistema sensorial somático y el tectum ha permitido mantener el registro espacial entre las dos modalidades sensoriales.

La correspondencia entre las representaciones visual e infrarroja del mundo en el tectum óptico de la serpiente de cascabel y del pitón sugiere una hipótesis fascinante. Quizás el tectum compare o combine señales de los dos sentidos. Sabíamos que algunas neuronas tectales de mamíferos respondían tanto a estímulos visuales como auditivos, o a visuales y táctiles. Se nos ocurrió que tal vez hubiera neuronas "multimodales" análogas en el tectum de la serpiente de cascabel.

Las primeras neuronas bimodales del tectum de una serpiente fueron identificadas por uno de nosotros (Hartline), Kass y Loop. El estímulo infrarrojo lo proporcionaba una mano o un soldador eléctrico y el visual un rectángulo de cartulina térmicamente neutra. Algunas neuronas tectales respondían a objetos calientes, se hallara la habitación a oscuras o a plena luz. Las mismas neuronas respondían a la cartulina, pero sólo si la habitación estaba ilumi-

nada. Llamamos a estas células neuronas "o", puesto que podían excitarse por estimulación de cualquiera de las dos modalidades.

Vimos también que había un número pequeño de neuronas tectales que respondían a objetos calientes, pero sólo si la habitación estaba iluminada. Estas neuronas no reaccionaban ante la barra de cartulina térmicamente neutra, aun cuando la habitación estuviera intensamente iluminada. Tampoco hacían caso a objetos calientes con la habitación a oscuras. Se designaron neuronas "y", puesto que la presencia simultánea de estímulos visual e infrarrojo parecía ser esencial para su respuesta. Hasta entonces no se habían descrito neuronas de este tipo para ninguna combinación de modalidades sensoriales en otros animales.

Nos planteamos (Newman y Hartline) la posibilidad de hallar otras clases de interacciones de las modalidades visual e infrarroja efectuando ensayos específicos. Construimos un estimulador controlado por ordenador que producía estímulos visuales e infrarrojos cuya intensidad, localización y duración eran independientes. Como en algunos trucos de magia, lo conseguimos con unos espejos bien colocados [*véase la ilustración de la página anterior*].

En un experimento típico se implantaba un microelectrodo registrador en el tectum óptico de una serpiente de cascabel y se ajustaba hasta registrar la respuesta eléctrica de una sola neurona. El ordenador generaba entonces una secuencia de estímulos infrarrojos, visuales y combinaciones infrarrojo-visuales; y registraba luego la respuesta de la célula. Se corría el microelectrodo hasta otra célula. Por este sistema seleccionamos y ensayamos varias veintenas de neuronas.

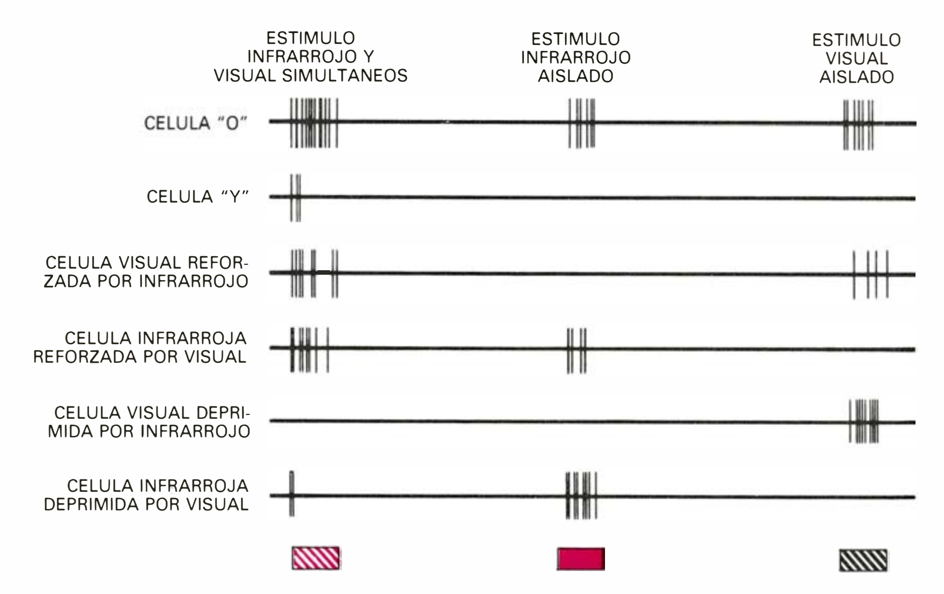
Nuestro presentimiento acerca de posibles modalidades exóticas de interacciones encontraba razón de ser. Descubrimos numerosas interacciones visuales-infrarrojas de nuevo cuño. Las respuestas de las células tectales, y por tanto las células propiamente dichas, se agrupaban, de forma natural, en seis clases, dos de las cuales eran las ya citadas neuronas "o" e "y". Confirmamos que las células "o" respondían a estímulos infrarrojos y visuales ejercidos aisladamente así como a los infrarrojo-visuales combinados. Las células "y" sólo actuaban en presencia de una estimulación simultánea infrarrojo-visual.

Otras dos clases de neuronas tectales presentaban interacciones "reforzadas" de las modalidades visual e infrarroja. Las bautizamos como células "infrarrojas reforzadas por visual" y células "visuales reforzadas por infrarrojo", según fuera el estímulo que producía el refuerzo. Así, una célula "infrarroja reforzada por visual" daba una respuesta moderada (digamos 4 impulsos nerviosos) a un estímulo infrarrojo presentado aislado; no se inmutaba ante un estímulo visual. Cuando los estímulos infrarrojo y visuales se presentaban juntos, se evocaba una gran respuesta (8 impulsos). La influencia excitadora del estímulo visual, aunque no fuera éste lo bastante intenso para generar una respuesta por sí mismo, reforzaba significativamente la respuesta al estímulo infrarrojo. Análogamente, una célula "visual reforzada por infrarrojo" no respondía a estímulos infrarrojos, pero sí ofrecía una respuesta reforzada a un estímulo visual cuando éste se acompañaba de uno infrarrojo.

Las neuronas tectales de las dos clases restantes presentaban interacciones inhibidoras de las modalidades infrarroja y visual. Las neuronas de una clase, las llamadas células "visuales deprimidas por infrarrojo", que respondían vigorosamente a un estímulo visual aislado, no daban respuesta, o respondían sólo débilmente, al estímulo combinado infrarrojo-visual. La influencia inhibidora del estímulo infrarrojo reducía o suprimía completamente la respuesta a un estímulo visual. Por el contrario, en células de esta clase, la desaparición de un objeto caliente o la introducción de uno frío mejoraba las respuestas visuales. Las neuronas de la otra clase, cuya respuesta infrarroja se inhibía por estímulos visuales, se denominaron células "infrarrojas deprimidas por visual".

¿Qué papel funcional podrían cumplir estas neuronas infrarrojo-visuales recién identificadas? Permítasenos responder a la pregunta a través del funcionamiento del tectum cuando una serpiente de cascabel identifica a su presa. Una descripción simplificada de tal comportamiento lo dividiría en varios procesos: detección y localización de un estímulo, identificación del estímulo y desencadenamiento del movimiento de orientación apropiado. Quizás intervenga también un proceso "de atención", en el que el animal se concentraría preferentemente sobre una región del espacio; un estímulo en esa región desencadenaría un movimiento de la cabeza o de los ojos, lo que no ocurriría con un estímulo equivalente en otra región.

Las células "o" y las células "reforzadas" serían de gran utilidad en los procesos de detección. Las células "o" acusarían los sucesos en una determinada región del espacio, prescindiendo de si la percepción es visual, infrarroja o de ambas a la vez. Las células "o" y las reforzadas responden a la estimulación combinada con mayor rigor que a la estimulación evocada por radiación visible o infrarroja solas. La detección y localización mejoraría por tales interacciones excitadoras, particularmente cuando ninguna de las modalidades se excita intensamente. Ejemplo de ello sería el caso de un ratón bañado por la



SEIS CLASES DE CELULAS TECTALES responden a estímulos infrarrojos y visuales. Los rectángulos de la parte inferior de la figura indican el transcurso temporal de los estímulos combinados infrarrojo y visual (*recuadro con trazos de color*), estímulo sólo infrarrojo (*recuadro de color*) y estímulo sólo visual (*recuadro con trazos*). Las células clasificadas como "o", "y" y "reforzadas" presentan interacciones excitadoras por llegada de potenciales infrarrojos y visuales. Las células "depresoras" responde sólo a uno de los dos estímulos y presentan interacciones inhibidoras cuando llegan potenciales de ambos.

luz tenue del anochecer y situado a una distancia cercana a la máxima detectable por la foseta. La suma de modalidades se produciría correctamente gracias a la similitud de la organización espacial de las modalidades infrarroja y visual.

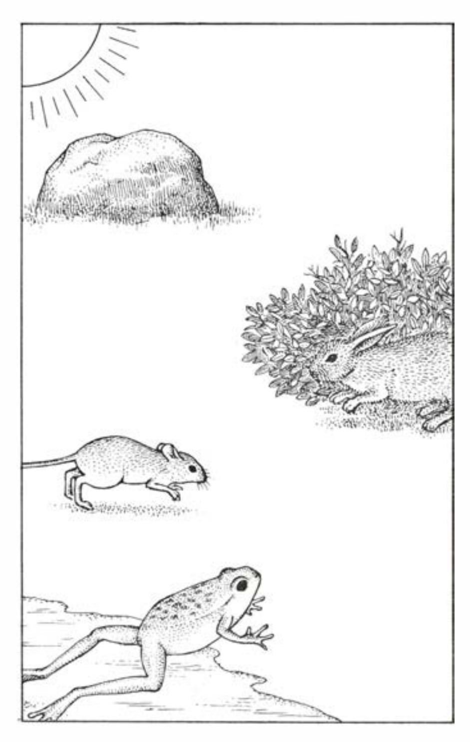
Las neuronas "o" y "reforzadas" podrían ofrecer su asistencia en procesos de atención, por ejemplo, si un objeto visible y caliente situado a un lado de la serpiente acaparara la atención de la maquinaria de orientación del cerebro. El componente infrarrojo del estímulo generaría un estado excitador elevado entre unidades "o" y "reforzadas" en una gran región tectal, dado que los campos receptivos infrarrojos son bastante grandes. El aumento de la excitación potenciaría la estimulación visual de ese objeto, o de otro cercano, en dicha región. La estimulación infrarroja serviría, por tanto, para desviar la atención hacia la parte correspondiente del espacio visual.

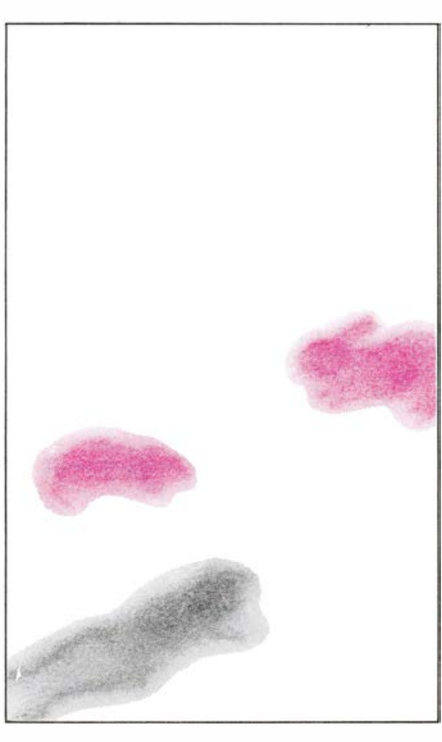
Las interacciones tectales infrarrojo-visual podrían participar también en procesos de identificación mediante la estimulación de neuronas de "detección de características", neuronas que responderían sólo a combinaciones específicas de estímulos infrarrojos y visuales. Las células "y", por ejemplo, se activan en presencia exclusiva de objetos que pueden detectarse simultáneamente por la foseta termosensible y por los ojos. Tal estimulación simultánea induce a las neuronas "y" a emitir un tren de impulsos breves y de alta frecuencia. Hemos observado que el estímulo más eficaz para estas células es un objeto pequeño, caliente y en movimiento. Diríamos, algo jocosamente, que se trata de detectoras de ratones.

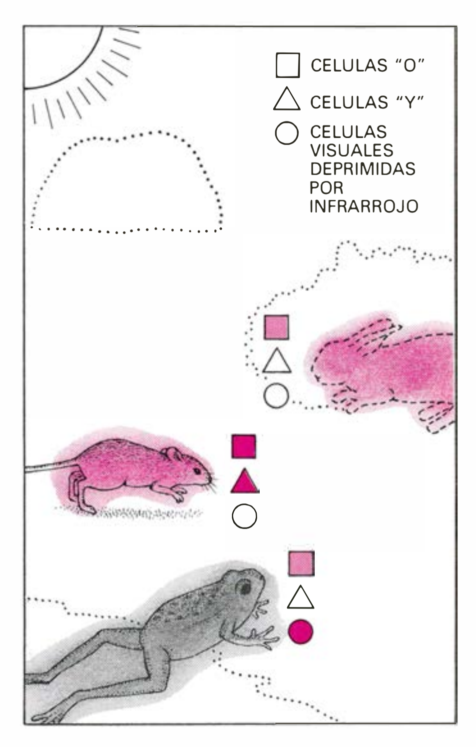
Las células "visuales deprimidas por infrarrojos", por otra parte, responden mejor a objetos térmicamente neutros u objetos visuales fríos: las hojas que mueve un soplo de aire o una rana saltando al borde de una charca. La actividad visual de estas células se deprimiría por la radiación infrarroja de los animales de sangre caliente. En tales ejemplos, las interacciones de modalidad cruzada son esenciales para una correcta identificación de los distintos estímulos.

Las interacciones de modalidad cruzada que hemos descrito muestran que, en el tectum de la serpiente de cascabel, las modalidades de los sentidos infrarrojo y visual se integran significativamente. ¿Podemos suponer que en el tectum óptico de otras especies operan también similares interacciones de combinación de modalidades? ¿Se combinan en los mamíferos señales táctiles y auditivas en vías complejas de información visual? No se sabe. Ni se han hecho los ensayos necesarios para identificar tales interacciones. Sin embargo, apostaríamos a que las clases de interacciones de modalidad que hemos observado en las serpientes se presentan también, y son funcionalmente importantes, en los tecta de la mayoría de los vertebrados.

Parece mentira que se conozca tan mal la utilización que las serpientes hacen de la sensibilidad infrarroja en su hábitat natural. Nadie sabe si las serpientes de cascabel y los pitones se sirven de sus detectores infrarrojos para cazar las presas durante el día, cuando opera también su sistema visual. Tampoco se sabe si las serpientes utilizan su sistema infrarrojo para identificar a los depredadores y localizar lugares confortables de descanso. Cuestiones todas interesantes que habrá que abordar en el futuro. Por lo pronto, impresiona ya bastante haber descubierto que en serpientes crotalinas y boidas el sentido cutáneo trigémino se ha transformado en un sentido con sensibilidad a distancia (proyectivo) que cumple una misión afín a la de la vista.







PANORAMA HIPOTETICO DEL MUNDO percibido por una serpiente de cascabel. El apunte de la izquierda representa una escena según la observaría el sistema visual de la serpiente. El central muestra la misma escena pero tal como la percibiría el sistema infrarrojo. Solamente detectaría los objetos con calor (*color*) o fríos (*gris*) y en movimiento. Objetos sin movimiento, tales como el matorral y la charca, no se representan, porque no estimulan bien el sistema infrarrojo. Incluso la roca calentada por el sol estaría ausente de la imagen infrarroja por carecer de movimiento. Las imágenes serían borrosas, dadas las escasas propiedades de definición de la foseta termosensible. El apunte de la derecha sugiere cómo podría analizar el tectum óptico la entrada combinada de los dos sistemas sensoriales. Las respuestas de tres de las seis clases de células tectales bimodales se representan por cuadrados, triángulos o círculos. Las células "o" se activarían fuertemente (*color intenso*) por el calor, más patente en el ratón y de menor intensidad (*color claro*) en el conejo, difícil de distinguir entre el matorral, y también por el componente visual de la rana fría. Las células "y" se activarían solamente por la presencia del ratón, que desprende calor y resulta claramente visible. La piel fría de la rana serviría para desinhibir las células "visuales deprimidas por infrarrojo".

Cocaína

Quienes la consumen como droga de evasión no pueden a menudo distinguirla de otras drogas, ni siquiera de un placebo. Sin embargo, los enormes lucros de su tráfico ilícito la han convertido en importante mercancía internacional

Craig Van Dyke y Robert Byck

En breves segundos y con ayuda de un canutillo de papel pueden aspirarse por la nariz unos cuantos centígramos de clorhidrato de cocaína finamente molidos y dispuesto su polvo en varias hileras sobre una superficie lisa. La inhalación produce en seguida sensaciones placenteras y de clarividencia y fuerza mental, que a la mayoría de la gente se les pasan al cabo de media hora poco más o menos. Aunque el creciente interés que por la cocaína se está dando en Estados Unidos y en Europa Occidental sea, en parte, una consecuencia de esta simple experiencia hedonista, la auténtica importancia de la droga dimana de la interacción de múltiples factores sociales, económicos y políticos: el que hoy esté de moda emplear la cocaína como droga "de evasión", la artificial inflación de su precio, el control de su distribución por organizaciones criminales, las alteraciones que su comercio clandestino origina en los sistemas monetarios y de tasas, las tensiones en que pone a los instrumentos de aplicación de la ley, las amenazas que contra las libertades cívicas encierran unas leyes anti-droga no basadas en la comprensión racional de los efectos de la droga, y, en fin, lo poderoso que resulta el tráfico de la cocaína para corromper a los funcionarios y socavar el respeto a la ley.

Las estimaciones del costo y del consumo de la cocaína están sujetas a las desviaciones y sesgos de las fuentes de información, así que deben considerarse con escepticismo. Según un informe redactado en 1979 por el Plan Estratégico de la Casa Blanca sobre el Abuso de Drogas, en los 12 meses precedentes habían tomado cocaína alrededor de 10 millones de estadounidenses, mientras que 20 años antes sólo la tomaban 10.000 personas. El Comité Nacional de Información sobre el Consumo de Narcóticos (NNICC) ha calculado que en 1979 entraron ilegalmente en los Estados Unidos entre 25.000 y 31.000 kilogramos de cocaína. Durante 1980, las entradas de cocaína en ese país anduvieron entre las 40 y las 48 toneladas. Estas cifras se basan en estimaciones de la capacidad de refino de los laboratorios clandestinos, así como de las proporciones que del producto ya refinado se venden en los mercados nacionales y extranjeros y de lo que las cosechas de coca en bruto les rinden a los países productores. Quizá no haya que sorprenderse de que los cálculos que del rendimiento de la cosecha se efectúan en los países productores resulten, en muchos casos, por debajo de la mitad o aún menos que los que se hacen en los Estados Unidos.

El clandestino traficante al por menor puede vender una sustancia blanca y cristalina, que conste desde un 10 hasta un 85 por ciento de cocaína más otros diversos componentes, a un precio de 100 a 140 dólares por gramo. Basándose en su estimación de la cantidad de cocaína importada en 1980, el NNICC calculó que el valor de la elaborada y vendida al por menor sumaría entre los 27.000 y los 32.000 millones de dólares. Si la revista *Fortune* incluyera el tráfico de cocaína en su lista de las 500 empresas industriales más importantes, ocuparía el séptimo lugar por su volumen de ventas en el mercado interior, situándose entre la Ford Motor Company y la Gulf Oil Corporation. En base a las estimaciones estadounidenses, el valor monetario de la cocaína que exporta Bolivia actualmente acaso supere lo que vale la mayor industria legal de aquel país, la del estaño, y a Colombia la exportación de su más refinada cocaína le reporta anualmente un total de unos mil millones de dólares, que es la mitad de lo que vale su cosecha de café.

Se supone con excesiva facilidad que las consecuencias fisiológicas y sociales del uso de la cocaína son proporcionadas a su popularidad y a su importancia económica. En realidad, las implicaciones médicas y psicológicas del uso ocasional o prolongado de la cocaína sólo se han empezado a determinar recientemente. En 1975, el Instituto Nacional para el estudio del Abuso de la Droga dio comienzo a un proyecto de investigación con miras a definir los efectos farmacológicos de la cocaína en el ser humano. Desde entonces, numerosos investigadores se han ocupado de los varios aspectos y campos científicos relacionados con la cocaína, incluyendo una detallada descripción de los efectos de la droga en el hombre, de su distribución y metabolismo en el cuerpo, sus propiedades reforzantes y los límites de su posible abuso.

Seis años de trabajos sobre esta problemática le han permitido, a nuestro grupo de la Facultad de Medicina de la Universidad de Yale, describir con razonable fiabilidad el curso temporal de los efectos farmacológicos básicos que siguen a la introducción de cocaína en el cuerpo humano por diferentes vías. También hemos podido asociar el ciclo de la concentración de cocaína en la sangre con mediciones contrastables de sus efectos psicológicos. Aunque la cocaína gratifica a algunas personas con un placer intenso, hemos comprobado que su capacidad de producir un "éxtasis" único quizá se sobrevalore: nuestros sujetos de experimentación, todos ellos avezados usuarios de la cocaína, no consiguieron distinguir una única dosis de cocaína tomada intranasalmente de la misma cantidad de lidocaína, anestésico local sintético. Investigadores de la Facultad de Medicina de la Universidad de Chicago han hallado que sus sujetos no podían distinguir los efectos inmediatos de una inyección intravenosa de cocaína de los de la anfetamina, aunque después de transcurrido algún tiempo sí que son notorias las diferencias entre estas drogas. Tales resultados constituyen los primeros pasos hacia la necesaria distinción entre la



LA MASTICACION DE LA HOJA DE COCA, representada aquí en esta figurilla de cerámica, ha sido un factor importante en la cultura de los pueblos andinos durante no menos de 5000 años. El alcaloide se extrae de las hojas del arbusto coca; los mascadores de esas hojas absorben directamente la sustancia. La figura simboliza a un hombre con el carrillo lleno de hojas de coca y que tiene en las manos los útiles asociados a la masticación: en la izquierda, el calabacín con la *llicta*, polvo alcalino que se va añadiendo a la mascada de coca mediante la ensalivada espátula que maneja el hombre con la diestra. En 1979, David Paly, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Yale, comprobó que añadiendo una sustancia alcalina a las hojas de coca aumentaba 10 veces la concentración de cocaína en el plasma sanguíneo. Esta figurilla, de 19,7 centímetros de altura, pertenece a la colección del Museo Indioamericano de Nueva York. Ha sido atribuida a la Fase I de la cultura Moche, que floreció en la costa norte del Perú entre el 100 a.C. y el 100 d.C.

poco menos que arrolladora mitología de que aparece rodeada la cocaína y una información fidedigna acerca de sus efectos.

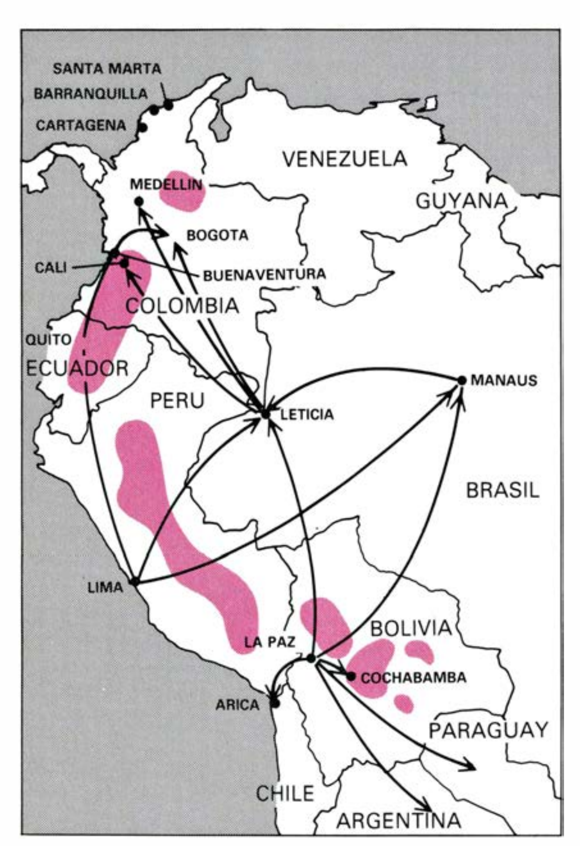
Al mismo tiempo ha venido aumentando el interés por conocer la historia del consumo de la cocaína, así como por comprender su importancia para las culturas indias de los Andes, que incluyen partes de las actuales Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia y Chile. Desde luego que la experiencia social y farmacológica de la región andina con la coca en rama no puede compararse directamente con la más extensa experiencia social respecto a la más potente sustancia que es el clorhidrato de cocaína, pero así y todo hay la esperanza de ganar una perspectiva cultural acerca de la droga. Y esa perspectiva es por lo menos tan importante para la política de información pública como pueda serlo el conocimiento de la acción bioquímica y farmacológica de la cocaína.

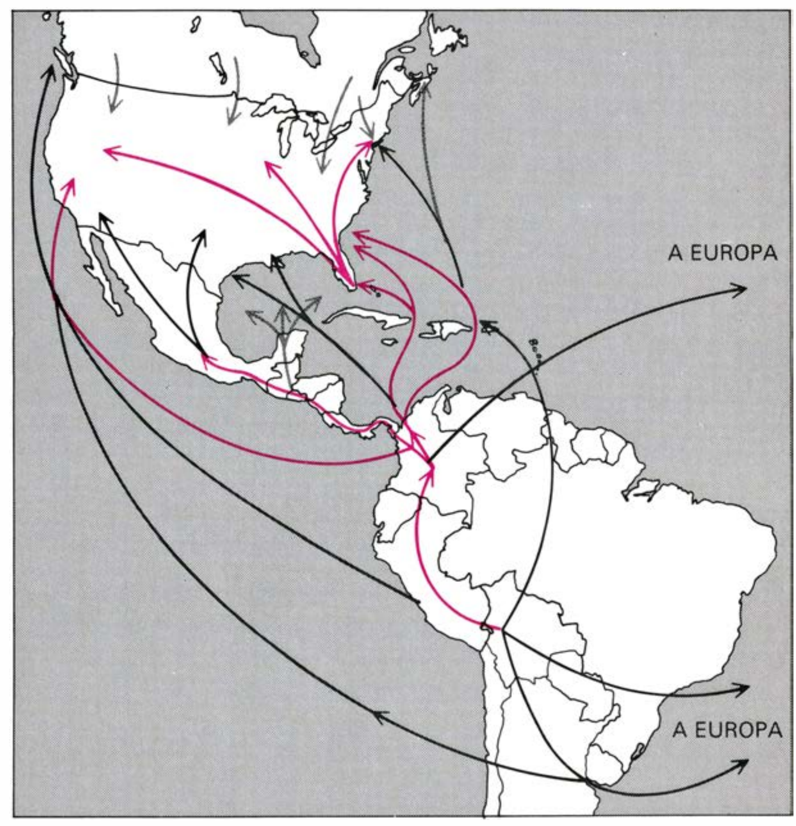
La cocaína es un alcaloide, perteneciente a un amplio grupo de sustancias vegetales en el que se incluyen también, entre otras, la nicotina, la cafeína y la morfina. En la naturaleza se halla la cocaína en cantidades importantes tan sólo en las hojas del arbusto coca, *Erythroxylum coca*, que requiere un clima húmedo y tropical. Según Timothy Plowman, del Museo de Campo de Historia Natural de Chicago, *E. coca* pudiera ser nativo de los Andes peruanos, aunque ahora brota por doquier en las tierras altas de la vertiente oriental andina del Ecuador, Perú y Bolivia. La concentración de cocaína alcaloide en sus hojas puede ser hasta del 1,8 por ciento. El arbusto de la coca fue cultivado por los incas y sigue siendo actualmente la fuente primaria de cocaína para el ilícito tráfico mundial.

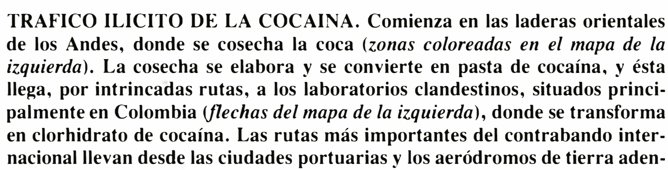
E. novogranatense, la otra especie de *Erythroxylum* rica en cocaína, se cultiva en regiones montañosas, más secas, de Colombia y a lo largo de la costa caribeña de Sudamérica. La coca *truxillense* o "Trujillo", una variedad de la última especie citada, se cultiva en la zona norte de la costa peruana y en el resguardado valle del río Marañón, tributario del Amazonas al nordeste del Perú. Sus hojas se recolectan para exportarlas legalmente a la Stepan Chemical Company, de New Jersey, donde se extrae la cocaína con fines farmacéuticos y el residuo se prepara como aromatizador para la Coca-Cola.

Recientes hallazgos arqueológicos efectuados en el Ecuador indican que la experiencia del hombre con la cocaína tiene al menos 5000 años de antigüedad, siendo muy anterior al establecimiento del imperio incaico. Para los incas era la coca una planta de origen divino y simbolizaba elevado rango social o político. Según un mito, el dios Inti creó la coca para aliviar el hambre y la sed de los incas, que se creían descendientes de los dioses. El estado inca controlaba virtualmente todos los aspectos de la vida diaria, incluidos el cultivo y el uso de la coca. La mascaban principalmente las clases dirigentes, si bien en ocasiones se les dispensaba a los soldados, a los obreros o a los mensajeros. Mascar irregularmente sus hojas se consideraba sacrílego.

Las primeras noticias que de la masticación de la coca les llegaron a los europeos coincidieron casi con el descubrimiento del Nuevo Mundo. Las cartas de Amerigo Vespucci, publica-






TRAFICO ILICITO DE LA COCAINA. Comienza en las laderas orientales de los Andes, donde se cosecha la coca (*zonas coloreadas en el mapa de la izquierda*). La cosecha se elabora y se convierte en pasta de cocaína, y ésta llega, por intrincadas rutas, a los laboratorios clandestinos, situados principalmente en Colombia (*flechas del mapa de la izquierda*), donde se transforma en clorhidrato de cocaína. Las rutas más importantes del contrabando internacional llevan desde las ciudades portuarias y los aeródromos de tierra adentro hasta distintos puertos de entrada en los Estados Unidos y en Europa. En el mapa de la derecha se han indicado con flechas de color las rutas que sigue el tráfico de mayor volumen de cocaína, y las restantes rutas aparecen en negro. Cuando el clorhidrato de cocaína llega a los países donde se distribuye, se le quita del 10 al 85 por ciento de su pureza mezclándolo con varios adulterantes. Las 40 o 48 toneladas de cocaína que debieron entrar en 1980 en los Estados Unidos alcanzaron un valor de 27.000 a 32.000 millones de dólares.

das en 1507, mencionan la práctica india de mascar hojas y añadir cenizas a su rumia. Uno de los componentes principales de la ceniza es el carbonato de cal o carbonato cálcico ($CaCO_3$), que intensifica los efectos subjetivos de las hojas de coca; entre los indios andinos se sigue dando hoy la práctica del añadir cal. A otros observadores europeos en un principio les sorprendió, después les repugnó y por último les impresionó el uso que los indios hacían de la coca. Un manuscrito redactado en 1613 por Don Felipe Guzmán Poma de Ayala describe el mascar coca como una actividad social no autorizada a la que se dedicaban los indios en ratos de trabajo.

Otros informes sobre el mascado de la coca hechos por exploradores y cronistas eran más entusiastas. Se aseguraba que la coca producía un sorprendente aumento de la resistencia física, capacitando a los hombres para trabajar duro con escasa alimentación y a grandes altitudes. En 1569 los empresarios españoles de Sudamérica habían reconocido ya la utilidad de la coca al reclutar indios para el trabajo, y el rey Felipe II aprobó oficialmente tal práctica declarando que la coca era necesaria para el bienestar de los indios.

Si las hojas de coca conservasen su potencia una vez secas y tras un largo viaje, como conservan la suya las hojas de tabaco y los granos de café, muy diferente de lo que es hoy sería la función de la coca en la sociedad europea y en la norteamericana. A Europa llegaron especímenes botánicos de la coca desde el momento de la conquista española. Las hojas de coca se siguieron exportando en pequeñas cantidades a Europa durante los siglos XVII, XVIII y comienzos del XIX. Sin embargo, a pesar de las entusiastas descripciones de los efectos que producía en los indios, los europeos no adoptaron la práctica de mascar coca. En términos de su importancia cultural, el auténtico salto del Atlántico por la coca hubo de aguardar a que en el siglo XIX se desarrollaran los métodos de análisis de los compuestos químicos. Cuando, gracias a estos métodos, se hicieron disponibles el alcaloide puro y las sustancias con él relacionadas, el contexto social era enteramente distinto del que prevalecía en el siglo XVI al irrumpir el café y el tabaco. La moderna historia social de la cocaína ha estado determinada en gran parte por las actitudes que a su respecto se formaron a finales del siglo XIX y por las reacciones contra aquellas actitudes.

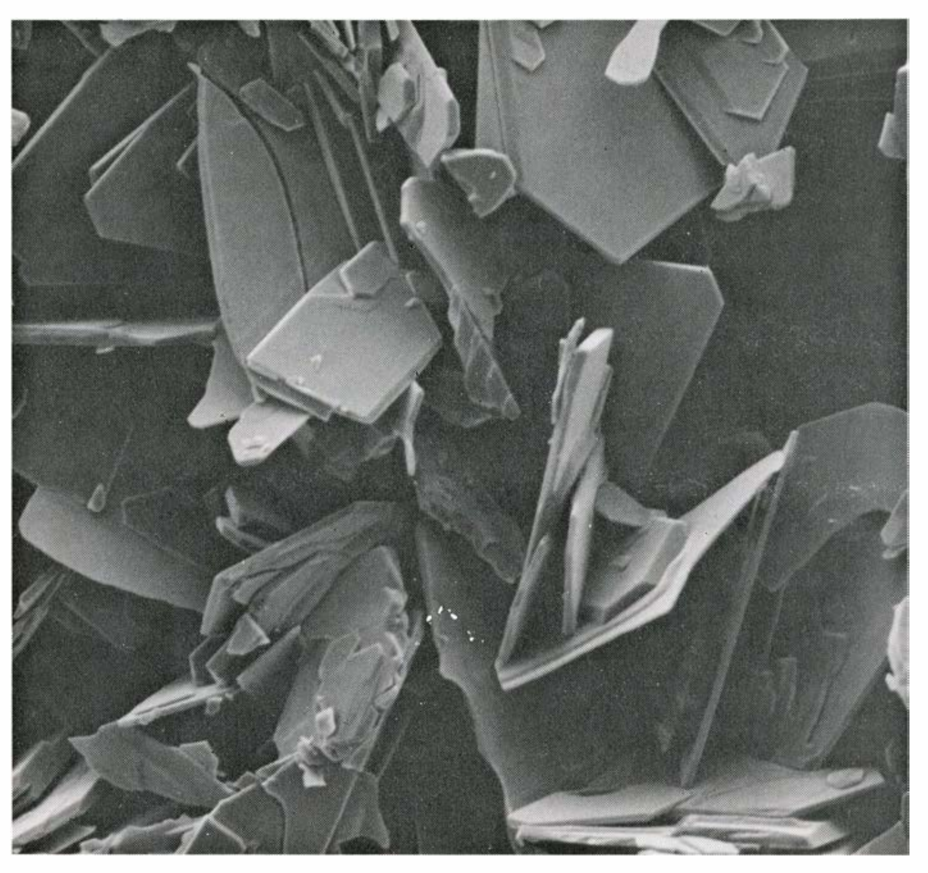


ARBUSTO DE LA COCA (*Erythroxylum coca*), que florece en las húmedas selvas tropicales de las vertientes orientales de los Andes, entre los 500 y los 1500 metros de altitud. En la hoja de este arbusto se encuentra cocaína alcaloide en concentraciones de hasta el 1,8 por ciento. Mediante el cultivo se consigue que la planta alcance los dos metros de altura, con lo que sus hojas son fáciles de cosechar. La cocaína se obtiene también de otras especies del género *Erythroxylum*, pero *E. coca* es el más rico en tal alcaloide.

El químico alemán Friedrich Gaedcke fue probablemente quien primero aisló cocaína alcaloide de la hoja de coca, en 1855, al preparar una sustancia oleosa y pequeños cristales procedentes del residuo destilado de un extracto de coca. Albert Niemann, de la Universidad de Göttingen, caracterizó químicamente la sustancia en cuestión, el año 1859. Niemann informó que la cocaína tenía un gusto amargo y que, a los pocos momentos, entumecía la lengua. En 1880, Vassili von Anrep, noble ruso y médico en la Universidad de Würzburg, notó que tras haberse administrado cocaína por vía subcutánea era insensible a un alfilerazo. Entre tanto, teniendo al parecer la cocaína efectos opuestos a los de las drogas que debilitan el sistema nervioso central, los médicos norteamericanos la estudiaron como posible antídoto que contrarrestara los hábitos engendrados por la morfina y por el alcohol.

En 1884, los informes encomiásticos de la cocaína llamaron la atención de Sigmund Freud, que era a la sazón un joven médico interno en la sección de neurología de un hospital de Viena. Aunque entre sus instructores figuraba von Anrep, al interesarse Freud por la cocaína la consideró, ante todo, no como anestésico local, sino como estimulante del sistema nervioso central y como una ayuda para superar la adicción a la morfina. Ingirió él mismo cocaína y publicó un estudio *Sobre la coca*, en el que pasaba revista a la literatura existente acerca de la coca y la cocaína.

El artículo *Sobre la coca* promovió el interés por la cocaína. Expresaba en aquellas páginas una opinión muy favorable acerca de la droga, y en cartas del mismo período describía de paso cómo "una pequeña dosis me elevó a las alturas maravillosamente". Aunque ya él indicó la posible utilidad terapéutica de la cocaína, para reducir el dolor de las inflamaciones, quedaría para su



CRISTALES DE CLORHIDRATO DE COCAINA vistos con un aumento de 600 diámetros en una exploración hecha con micrografía electrónica por Alan Pooley, del Museo Peabody de la Universidad de Yale, en colaboración con uno de los autores (Byck). La sustancia casi pura raramente la consiguen los usuarios de la cocaína. Los cristales se disuelven en las membranas mucosas y pasan a la corriente sanguínea.

amigo y compañero Carl Koller el mérito de reconocer plenamente lo que implicaban las propiedades de la cocaína en orden a su empleo como anestésico local. Koller la aplicó en la cirugía del ojo y estableció así el crítico nexo entre sus propiedades anestésicas locales y el procedimiento quirúrgico.

El intento de demostrar que la cocaína y la morfina podían ser empleadas antagónicamente, de modo que cada una contrarrestase los efectos de la obra, no dio tan buenos resultados. El médico norteamericano William Stewart Halsted se convirtió en una de las primeras víctimas de la dependencia de la cocaína a raíz de los experimentos que hizo en sí mismo para probar que la droga podía actuar de "neurobloqueador". El aislamiento a bordo de una goleta no sirvió de nada para controlar el hábito, y Halsted fue tratado con morfina en la esperanza de que sus, al parecer, opuestos efectos farmacológicos terminarían con su afán de cocaína. Desgraciadamente, con ello sólo vino a añadirse a la dependencia psicológica, que Halsted padecía respecto a la cocaína, otra dependencia física respecto a la morfina, que perduró hasta el final de su existencia.

Como la ineficacia de la cocaína en el tratamiento de la adicción a la morfina acabó por reconocerse y comenzaron a circular noticias gravemente preocupantes a propósito de la cocaína, empezó a desvanecerse el entusiasmo de Freud por la droga. Aunque él mismo seguía gustando de ingerirla, llegó a alarmarse cuando, a los tres años de iniciadas sus primeras investigaciones sobre la cocaína, Albrecht Erlenmeyer le acusó de haber dado suelta a "la tercera plaga de la humanidad" (después de las del alcohol y de los opiáceos).

Las descripciones que de los efectos de la cocaína en el hombre hicieron Freud y sus colaboradores no han sido superadas en cerca de 90 años. La mayoría de los posteriores trabajos científicos sobre el tema han tratado de hallar los mecanismos bioquímicos que explicarían las observaciones de Freud; han abundando también los rumores, las anécdotas y las invectivas. El interés por la cocaína giraba principalmente en torno a sus propiedades como anestésico local, y a resultas de este interés fue la cocaína uno de los primeros alcaloides que se sintetizaron químicamente. Richard Willstätter y sus colegas, de la Universidad de Munich, lograron la síntesis en 1923, pero la estructura espacial de la molécula de cocaína permaneció ignorada hasta que E. von Hardeggar y Hans Ott la descubrieron en 1955.

Un anestésico local bloquea la transmisión del impulso de un nervio sensorial cuando al nervio se le aplica directamente la droga. Mientras que muchas sustancias sólo pueden bloquear la conducción nerviosa dañando o destruyendo definitivamente el tejido del nervio, lo singular del anestésico local es que su efecto es temporal y reversible. Muchas de las drogas localanestesiantes que han sido sintetizadas desde finales del siglo pasado, tales como la procaína (Novocaína) y la lidocaína (Xylocaína), se asemejan estructuralmente a la cocaína y funcionan en virtud de un mecanismo similar.

El anestésico local inhibe el impulso nervioso alterando la membrana de la célula nerviosa. Cuando la neurona se halla en su estado de reposo hay una diferencia de potencial eléctrico de 60 a 70 milivolt entre el interior del axón (que es el filamento conductor de impulsos que emerge del cuerpo de la célula) y el fluido que envuelve al axón. El axoplasma de dentro del axón es eléctricamente negativo con respecto al fluido exterior a la membrana de la célula. Al ser estimulada la célula, la señal llamada potencial de acción recorre el axón como una onda de despolarización eléctrica. Una ligera despolarización de la membrana axónica suele producir un gran aumento transitorio de la permeabilidad de la membrana a los iones de sodio, con carga positiva, que hay fuera de la célula. A medida que estos iones van pasando a través de los canales de la membrana y entran así en el axoplasma, se va reduciendo la diferencia de potencial entre el axoplasma y el fluido que lo envuelve. El movimiento de carga es un proceso autolimitante, y poco después del inicio del potencial de acción salen del axón el potasio, el calcio y otros iones de carga positiva, con lo que se restablece el equilibrio electroquímico de la célula.

No se sabe con exactitud cómo altera un anestésico local la membrana del axón. Se supone que las moléculas del anestésico se disuelven en la matriz lipídica que constituye la membrana y se adhieren a receptores situados en los canales de sodio. La presencia de la molécula anestésica en el receptor impide probablemente la abertura del ca-

nal, bloqueando así el tránsito de los iones de sodio a través de la membrana. De este modo se impide la despolarización del axón y el impulso del nervio queda bloqueado. La acción del anestésico termina con la degradación de las moléculas anestésicas y su difusión en la corriente sanguínea.

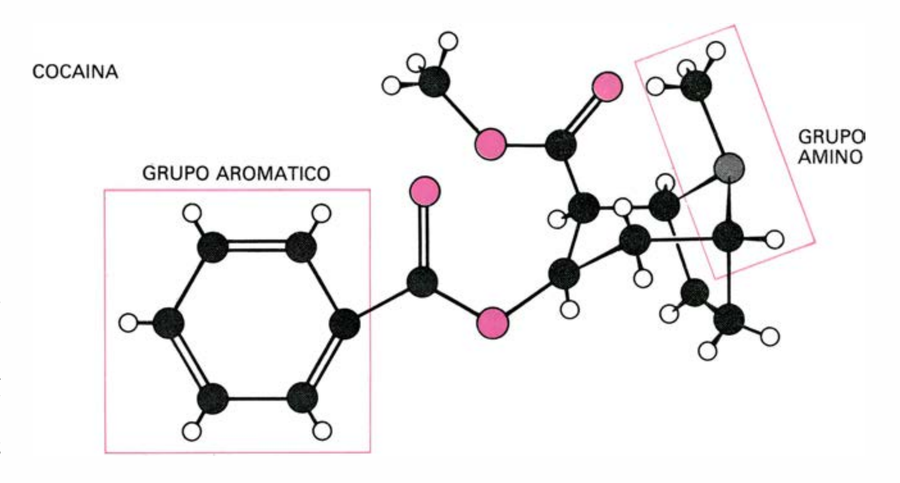
Otra propiedad de la cocaína que ha sido valorada en la medicina clínica es su tendencia a contraer los vasos sanguíneos cuando se la aplica tópicamente. Se trata del único anestésico local que produce este efecto, y hasta hace poco era el anestésico preferido en la cirugía del ojo por su capacidad para reducir el flujo sanguíneo. Pero últimamente se ha averiguado que la reducción del flujo puede perjudicar la superficie ocular, por cuya razón no se aconseja ya a los oftalmólogos. Conserva un papel en la cirugía de las membranas mucosas, como son las del oído, las de la nariz y las de la garganta, así como en los procedimientos que requieren el paso de un tubo por la nariz o por la garganta.

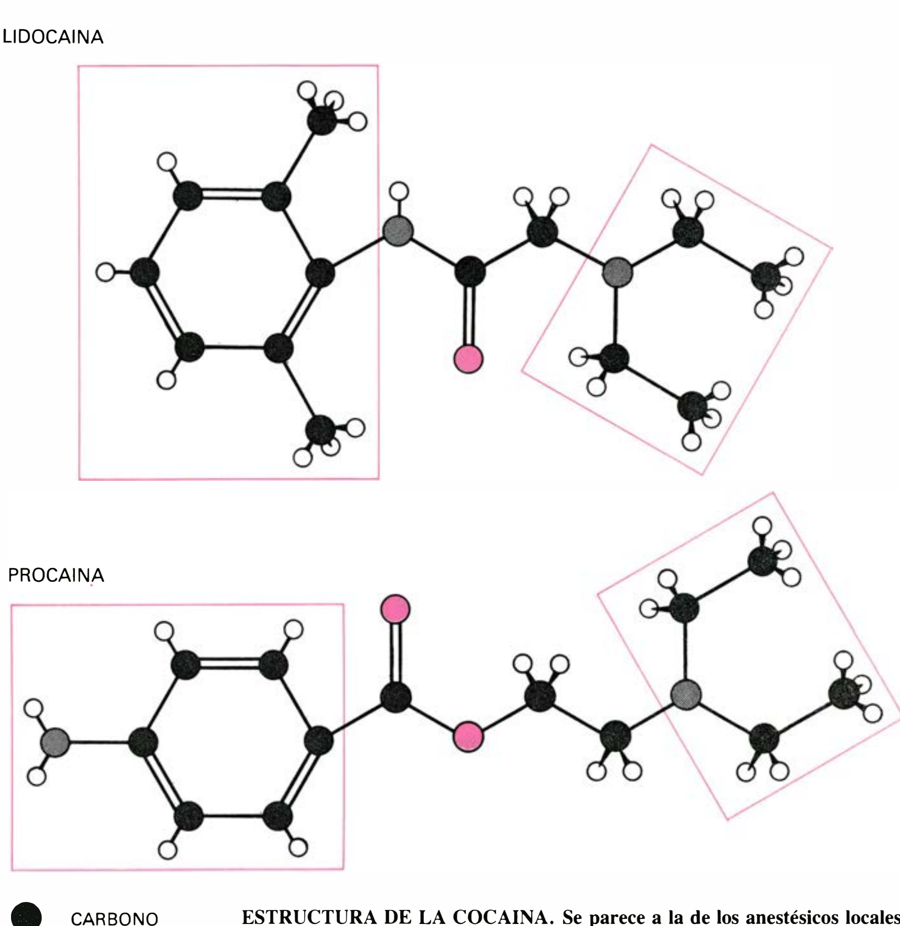
La constricción de los vagos sanguíneos es uno de los varios efectos periféricos causados por la estimulación del sistema nervioso simpático. Las drogas que actúan sobre los nervios del simpático imitando tales efectos reciben el nombre de drogas simpaticomiméticas. La cocaína es un típico agente simpaticomimético, puesto que acelera el ritmo cardíaco, eleva la tensión de la sangre y, suministrada a grandes dosis, aumenta la temperatura del cuerpo y dilata las pupilas.

La continua transmisión de señales a través de la red nerviosa del sistema simpático es esencial para la vida. En el axón, la señal toma la forma de un potencial de acción, pero cuando este potencial llega al final de un axón, la señal se transmite a la célula nerviosa más próxima por un mecanismo diferente, a saber, por la liberación de un neurotransmisor, como la dopamina o la norepinefrina. El neurotransmisor está almacenado en unas vesículas que el axón tiene cerca de la sinapsis, o conjunción del axón de cada célula nerviosa con las dendritas de la célula vecina. Cuando el axón se excita, las vesículas se fusionan con la membrana de la célula y descargan el neurotransmisor vertiéndolo en la hendidura sináptica que hay entre las células. Las moléculas liberadas estimulan la neurona siguiente adhiriéndose a las partes receptoras que hay en sus dendritas.

De ordinario, las moléculas neurotransmisoras que no han estimulado la célula nerviosa vecina son degradadas por enzimas, o bien se dispersan por los tejidos adyacentes o vuelven a introducirse en la zona terminal de la célula que las liberó. A su bombeo de retorno se le llama reabsorción. Pero cuando las moléculas de la cocaína están presentes en el hiato sináptico (también llamado hendidura sináptica), inhiben el mecanismo de reabsorción e imitan así los efectos de la liberación de más moléculas neurotransmisoras. El neurotransmisor tiende a permanecer en el hiato, donde puede seguir estimulando los receptores que hay en las dendritas de la neurona vecina.

Se creía antes que los efectos estimulantes del psiquismo producidos por la cocaína podían atribuirse tan sólo a su



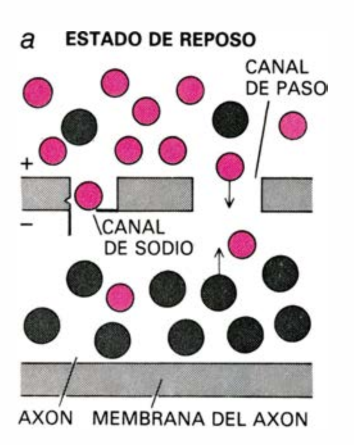


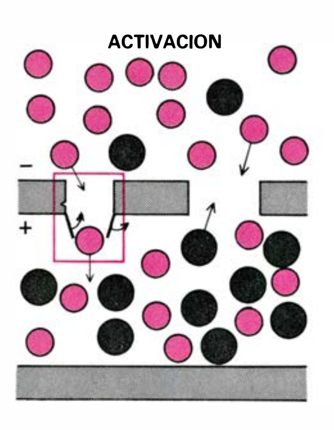
ESTRUCTURA DE LA COCAINA. Se parece a la de los anestésicos locales sintéticos lidocaína (Xylocaína) y procaína (Novocaína). Las tres moléculas contienen un grupo aromático que explica su solubilidad en los tejidos grasos, como lo es el del cerebro, y un grupo amino, que incluye un átomo de nitrógeno. La lidocaína y la procaína se cuentan entre los adulterantes que, por su menor precio, a veces se añaden a la cocaína de venta callejera. Los autores hallaron que cuando la cocaína se administraba intranasalmente no lograban distinguirla de la lidocaína ni siquiera experimentados usuarios de la cocaína.

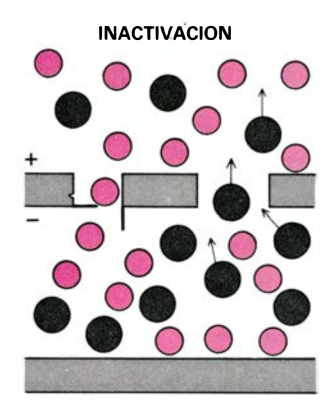
poder de bloquear la reabsorción de la norepinefrina. Hoy sabemos que no es así. Muchas de las drogas antidepresivas que se emplean en psiquiatría, tales como la amitriptilina (Tryptizol), bloquean la reabsorción de los neurotransmisores y, sin embargo, no son estimulantes y no inducen euforia. Por otro lado, no parece que haya muchas razones para suponer que un anestésico local como la lidocaína tenga que causar tampoco la euforia, aunque nuestras investigaciones han demostrado que sí la causa. Una sola dosis de lidocaína, administrada por vía nasal, no puede distinguirse de la misma cantidad de cocaína. Más aún, otros equipos han demostrado que algunos animales se afanan indistintamente en una tarea tanto por conseguir inyecciones de procaína como por conseguirlas de cocaína. Puesto que las moléculas de la cocaína, las de la lidocaína y las de la procaína se parecen estructuralmente, tales averiguaciones quizás indiquen tan sólo que drogas similares son causa de experiencias similares. Pero acaso indiquen también que ciertos tipos de euforia droguinducida son interpretaciones generalizadas, por el usuario de la droga, de una gama bastante amplia de sensaciones poco comunes producidas por la interacción de varios factores fisiológicos y ambientales.

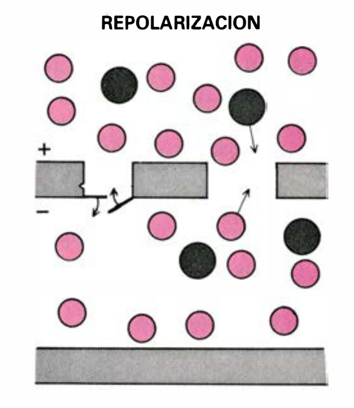
Los efectos de una droga dependen de la dosis, de la forma de tomarla y de la vía por la que entra en el cuerpo. Muchos efectos varían también según sea la frecuencia con que se toma la droga: el cuerpo puede ir acumulando la droga o desarrollando una tolerancia a ella. Los efectos de las drogas psicoactivas difieren también de acuerdo con las expectativas del usuario, el conjunto de circunstancias en que se toma la droga y el historial y la personalidad de quien la toma. La importancia que tienen estas tres últimas variables en la determinación de los efectos generales de una droga hacen difícil el estimar con exactitud qué porción de la experiencia de la cocaína haya de atribuirse a la sustancia misma y qué otra al ambiente o a la expectativa.

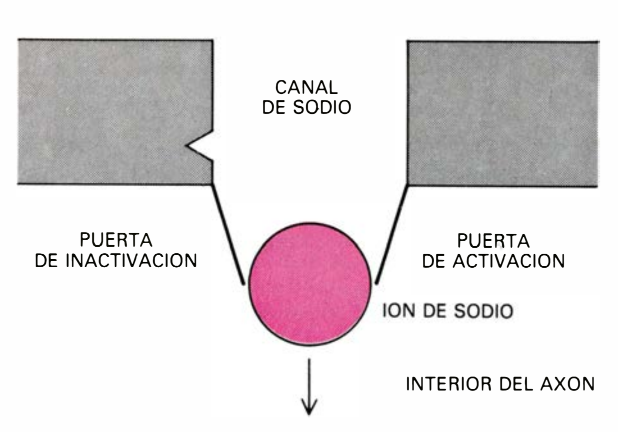
Cuando se toma cocaína con fines hedonísticos, la expectación y la mitología en torno a la droga pueden generar impresiones subjetivas que superen cualesquiera efectos no acordes con las expectativas. Es más, la cocaína adquirible en la calle probablemente estará adulterada, lo cual complica la farmacología de la droga. El elemento adulterador puede consistir en algún estimulante barato, como la anfetamina, en un simple hidrato de carbono como el manitol o la lactosa, en un anestésico local como la procaína o la lidocaína, o

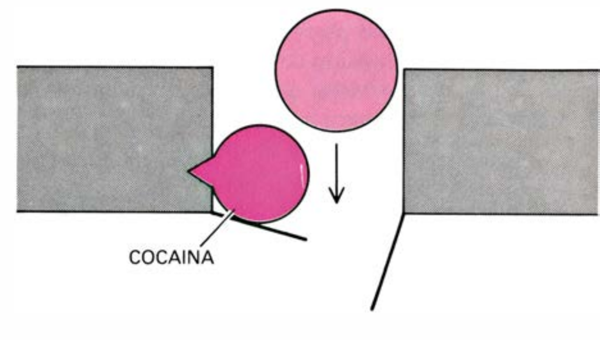










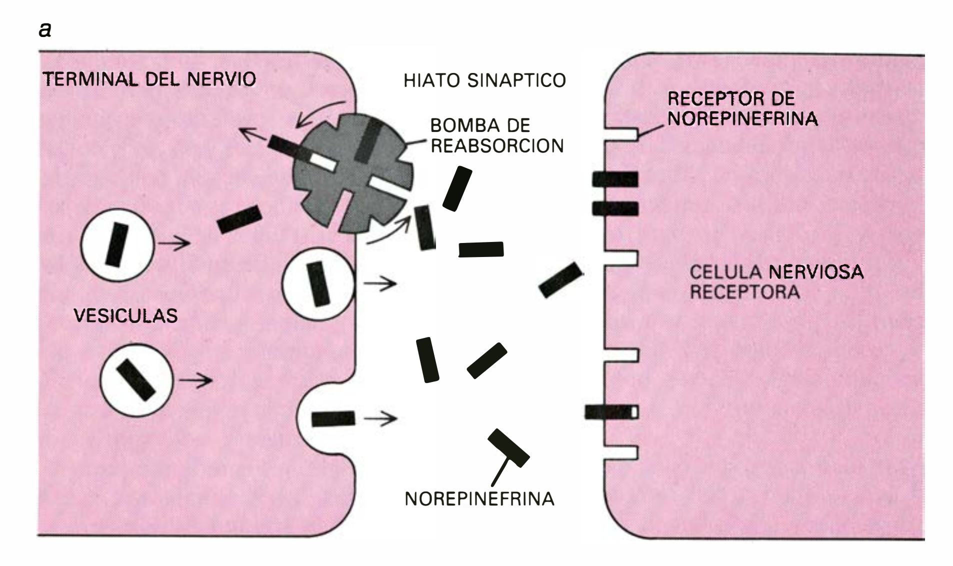


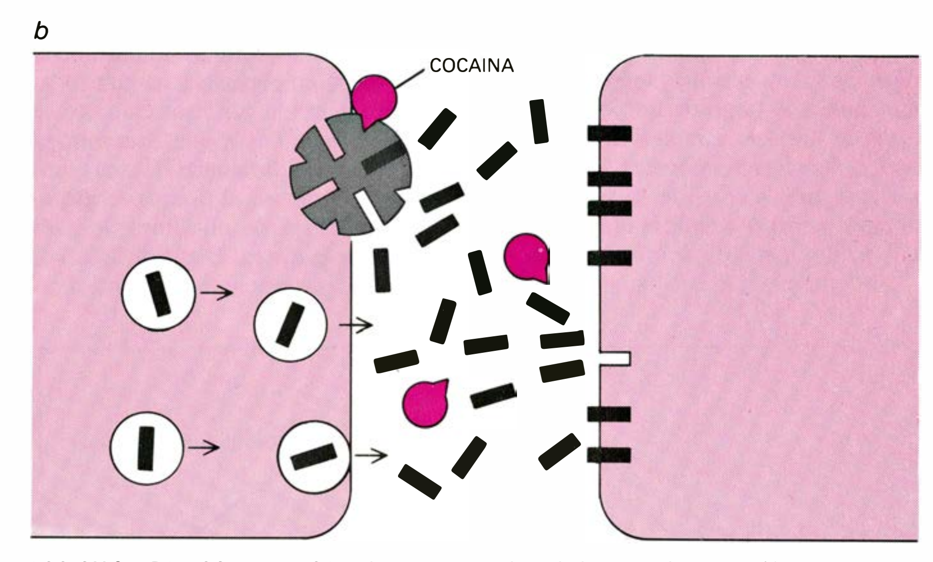
LOS ANESTESICOS LOCALES inhiben la transmisión de los impulsos del nervio sensitivo modificando la permeabilidad de la membrana axónica a los iones de sodio. Normalmente, el impulso se propaga en forma de onda de despolarización que pasa a través de la membrana; durante la despolarización, la diferencia de potencial eléctrico entre el axoplasma y el fluido que envuelve al axón se altera momentáneamente. Como se muestra en el diagrama esquemático (*a*), un canal de paso permite a los iones cargados positivamente de dentro y fuera del axón atravesar la membrana axónica en ambas direcciones. No obstante, la concentración de iones sodio (*círculos de color*) se mantiene a un nivel superior fuera del axón que en el interior del mismo en virtud de una bomba de sodio (no representada), mientras que la concentración de potasio, calcio y otros iones (*círculos negros*) es mayor dentro del axón. (En el diagrama se han exagerado las respectivas concentraciones por mor de claridad.) En el estado de reposo se logra el equilibrio cuando el interior del axón está cargado negativamente con respecto al exterior. Cuando se estimula el nervio (*b*), las puertas de activación que hay en los canales de sodio de la membrana empiezan a abrirse, permitiendo sólo a los pequeños iones de sodio emigrar al interior del axoplasma. Se reduce así la diferencia de potencial entre el interior y el exterior del axón. A medida que los canales de sodio se van cerrando por las puertas de inactivación, otros iones salen del axón para repolarizar la membrana. En presencia de la cocaína (*c*) los iones sodio no pueden pasar por el canal de sodio, principalmente por hallarse bloqueado por la cocaína, pero también porque la puerta de inactivación se mantiene más fuertemente cerrada. De este modo queda bloqueado el impulso nervioso.

en cualquier otra sustancia no inmediatamente detectable por el comprador de la cocaína. Por otro lado, cuando la cocaína se da en condiciones controladas, de laboratorio, los estímulos que pueden aumentar o modificar sus efectos están, de ordinario, ausentes. El conocimiento de los efectos agudos de la cocaína se ha de recabar de una combinación de descripciones individuales, susceptibles de mil influjos desfiguradores, e informes de los laboratorios, que pueden analizar hasta tal punto la experiencia de la droga que la hagan irreconocible.

Los efectos de las expectativas del que toma la droga no pueden eliminarse por completo ni siquiera en el laboratorio. La ética de la investigación sobre las drogas con sujetos humanos solamente permite estudiar los efectos de la cocaína en individuos que ya tienen experiencia de su uso. Estos sujetos puede que desvirtúen los resultados de los experimentos, porque sus expectativas respecto a la cocaína se han formado en condiciones muy diferentes de las del laboratorio. Para minimizar tales influjos deformantes importa mucho que ni el experimentador ni el sujeto de la experimentación sepan qué dosis (si alguna) ha sido administrada; para controlar las expectativas debe entremezclarse algún placebo con las dosis activas de cocaína.

Para fijar un marco dentro del cual organizar las respuestas de nuestros sujetos a la cocaína, necesitábamos una medida de la cocaína presente en el cuerpo. En 1975, David Bailey y Peter Jatlow, de la Facultad de Medicina de Yale, idearon un fino procedimiento específico para determinar la concentración de cocaína en el plasma sanguíneo, sirviéndose de un cromatógrafo de gases, instrumento en el que se hace pasar a las moléculas de una muestra de gas por una columna llena de un material adsorbente. Los diversos tipos de moléculas del gas son adsorbidos y liberados a distintas velocidades, de modo que puede identificarse una sustancia por el tiempo característico que tarda en pasar a través de la columna. Para aumentar la sensibilidad del artefacto respecto a la cocaína, Bailey y Jatlow instalaron un detector especialmente sensible a los compuestos que contienen nitrógeno, como es el caso de la cocaína. El procedimiento posibilitó por primera vez medir las concentraciones de cocaína en la sangre hasta cantidades ínfimas, del orden de los 5 nanogramos por mililitro. Cabe así determinar





ACCION SIMPATICOMIMETICA de la cocaína. Resulta del bloqueo de la reabsorción de neurotransmisores, como la norepinefrina, en la sinapsis del sistema nervioso simpático. (El sistema nervioso simpático controla funciones como el latido cardíaco y la presión de la sangre.) Cuando las moléculas del neurotransmisor salen de las vesículas que hay en el terminal del nervio (*a*), cruzan el hiato (o hendidura) sináptico y estimulan la siguiente célula nerviosa. Ordinariamente algunas de las moléculas neurotransmisoras que quedan en el hiato son rebombeadas al interior del nervio que las soltó. En presencia de la cocaína se bloquea (*b*) la acción del bombeo de reabsorción y el estímulo efectuado por las moléculas neurotransmisoras aumenta a medida que se va incrementando su concentración en el hiato sináptico.

los efectos de las dosis que se toman, por lo común, con fines placenteros y antes de las operaciones quirúrgicas.

Anteriormente al trabajo de Bailey y Jatlow, la determinación de la concentración de cocaína en la sangre se veía obstaculizada por la presencia en la sangre del enzima pseudocolinesterasa, responsable de la degradación del neurotransmisor acetilcolina y que destruye también a la cocaína. Añadiendo al plasma fresco iones de fluoruro hallaron Bailey y Jatlow que podía inhibirse la acción del enzima. El progreso técnico ha permitido determinar los niveles de cocaína en el plasma sanguíneo entre los mascadores de coca sudamericanos, en condiciones no directamente accesibles a los instrumentos de medición de los laboratorios.

En la forma de sal clorhidrato, la cocaína se absorbe fácilmente a través de las membranas mucosas y entra en la corriente sanguínea. Por razones ignoradas la vía más popular de su administración es a través de las membranas mucosas nasales, aunque nuestro grupo ha demostrado que los cristales de clorhidrato de cocaína también se disuelven y absorben eficientemente en el tracto gastrointestinal. Puede introducirse por vía intravenosa o absorberse a través de los pulmones fumando la sustancia alcaloide a la que los usuarios denominan "libre base". En América del Sur los jóvenes de las ciudades

fuman actualmente un producto intermedio del proceso de fabricación del clorhidrato de cocaína, al que llaman "pasta de cocaína" o "pasta de coca", que viene a equivaler del 30 al 90 por ciento de la cocaína "libre base". En los Estados Unidos se venden útiles de laboratorio doméstico para transformar el clorhidrato de cocaína en cocaína "libre base", que se descompone menos al calor. La libre base se vaporiza mediante gases calientes generados en un instrumento denominado tubo base; se inhalan esos vapores.

En algunos estudios de laboratorio se ha administrado la cocaína intravenosamente, porque puede determinarse con precisión el momento en que la droga se ha absorbido completamente. La concentración de cocaína en la sangre es máxima inmediatamente después de la inyección; luego va disminuyendo a lo largo de un período que dura de 45 a 90 minutos. Los sujetos experimentales manifiestan intensa euforia, seguida a veces de un "derrumbamiento" (*crash*) o extremada disforia y una ávida demanda de más cocaína.

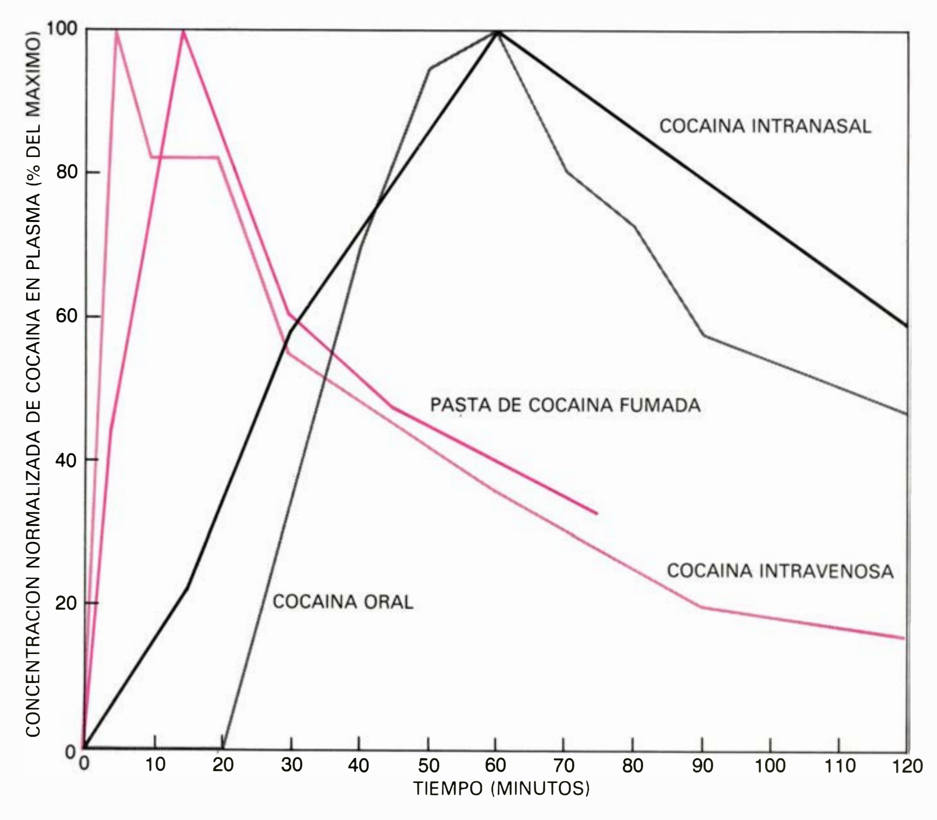
Los efectos de la cocaína introducida en vena son de tan corta duración que muchas de las pruebas, un tanto lentas, de sus efectos no pueden practicarse. En vez de ellos, preferimos examinar los efectos fisiológicos y psicológicos de la introducción de cocaína por la nariz. No pedimos a nuestros sujetos que aspirasen los cristalillos de cocaína a través de una paja o de un billete de dólar enrollado, ni nos atuvimos al común ritual de ir administrando a intervalos regulares cantidades relativamente pequeñas de cocaína (alrededor de 30 miligramos); sino que dimos dosis únicas, pero altas, mediante un vaporizador por vía nasal, de manera que pudiésemos estudiar con detenimiento el curso temporal de la acción de la droga.

Los efectos fisiológicos de la cocaína así introducida no son muy llamativos. Como era de esperar, comprobamos que las dosis más altas elevaban el nivel de presencia en el plasma sanguíneo, si bien, en aparente contradicción con la fama que tiene la cocaína como droga de efectos poco duraderos, las máximas concentraciones en el plasma se alcanzaban alrededor de una hora después de tomarse la droga. Dosis de 25 a 100 miligramos incrementaban el ritmo cardíaco entre ocho y 10 latidos por minuto y elevaban la presión sistólica y diastólica de la sangre alrededor de los 10 milímetros de mercurio. Estos efectos eran máximos de los 15 a los 30 minutos después de administrada la droga. A la dosis relativamente alta de dos miligramos por kilogramo de peso del cuerpo (o sea, 140 miligramos para una persona de peso medio) se producía un ligero aumento de la temperatura, sin que se dilataran necesariamente las pupilas.

Aunque la cocaína, como todos los demás anestésicos locales, causa convulsiones si se toma a dosis muy altas, no hay ningún efecto discernible en el electroencefalograma cuando la dosis es de 2 miligramos por kilogramo de peso del cuerpo. Sin embargo, en los animales, repetidas dosis pequeñas de cocaína pueden provocarles convulsiones. El uso crónico de la cocaína llega a originar la brusca aparición de un comportamiento que parece psicótico. Algunos investigadores han sostenido que esto quizá sea el resultado de un "efecto de encendido" por el que una serie de pequeñas dosis desencadene una respuesta sólo esperable, normalmente, de una dosis mucho mayor.

Nuestro interés por la cocaína se debe, entre otras razones importantes, a su probada capacidad de producir en muchas personas emociones positivas. Para medir los efectos psicológicos de la cocaína nos servimos de varios tests que suelen emplearse en el estudio de los estados de ánimo y del dolor. En uno de ellos se le pide al sujeto que marque un punto en una línea en la que hay clasificados seis grados de sentimientos eufóricos o depresivos. Otro test pone ante el sujeto una lista de adjetivos tales como "alegre", "suspicaz", "preocupado", "atento", "soñoliento" y "desanimado", junto con una escala sobre la que habrá de indicar en qué grado es aplicable cada uno de estos adjetivos a su actual estado de ánimo.

En experimentos hechos en otros laboratorios, los sujetos fueron incapaces de distinguir entre una dosis pequeña, de 10 miligramos, de cocaína y un placebo. En cambio, cuando se les dieron intranasalmente de 25 a 100 miligramos de cocaína, todos manifestaron de manera fidedigna la máxima euforia entre los 15 a los 30 minutos. De 45 a 60 minutos después de la dosis de 100 miligramos, dos de los siete sujetos experimentaron ansiedad, depresión, fatiga y deseo de más cocaína. Hay a menudo un derrumbe o período de extremo malestar tras haber fumado o haberse



CURSO TEMPORAL de la concentración de cocaína en el plasma sanguíneo, representado gráficamente para dosis de cocaína introducidas en el cuerpo por cuatro vías distintas. Las concentraciones han sido normalizadas, de modo que todos los valores se dan como porcentajes del valor máximo. Una vez alcanzada la más alta concentración, la cocaína tiene una vida media en la corriente sanguínea de alrededor de una hora. Las diferencias en los efectos psicológicos de la cocaína, según se la administre por unas vías o por otras, se deben probablemente a los diferentes tiempos que requiere la concentración del alcaloide en el plasma para alcanzar su valor más alto. La cocaína fumada o inyectada al circuito venoso se concentra más deprisa en el plasma sanguíneo que la succionada nasalmente o la que se ingiere por vía oral.

inyectado cocaína, pero esto no es tan frecuente a raíz de su uso intranasal. El público asocia la mayoría de las drogas a un único efecto, pero, según lo que las experiencias de la calle y de los laboratorios notifican, está claro que los placenteros efectos de la cocaína tomada a dosis relativamente pequeñas se convierten, a dosis más altas, en perturbadoras emociones.

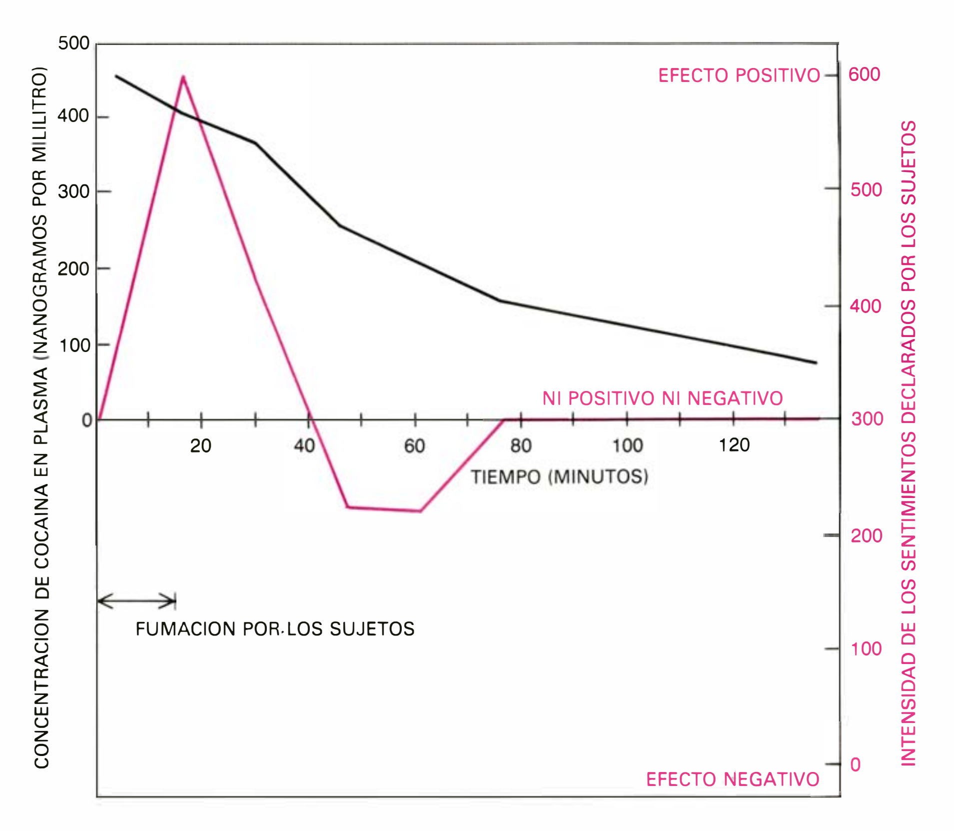
Si se compara el curso temporal de los efectos fisiológicos de la cocaína con el de su concentración en el plasma sanguíneo, se echa de ver que cuando mayor es la euforia es poco antes de que empiece a disminuir la concentración. Los efectos eufóricos desaparecen varias horas antes de que la concentración en el plasma se reduzca a cero; parecida relación temporal entre las sensaciones subjetivas y la concentración en el plasma se advierte también en los efectos de otras drogas tales como el alcohol o las benzodiazepinas. Cuando la cocaína se fuma o se toma por vía intravenosa, puede seguir el malestar hallándose todavía la concentración en el plasma a la mitad de su máximo.

La no correspondencia entre el curso temporal de la concentración en el plasma y el del sentimiento de euforia sugiere que los efectos psicológicos de la cocaína tengan que ver con la rapidez del cambio de la concentración en el plasma más que con su nivel absoluto. Como la concentración en el plasma varía con mayor celeridad cuando la cocaína se fuma o se inyecta que cuando se aspira por la nariz o se toma por la boca, serían de esperar unas consecuencias psicológicas más fuertes del fumarla o inyectarla si el factor decisivo fuese la velocidad del cambio de concentración. Las emociones referidas por los sujetos experimentales concuerdan con esta hipótesis. A su vez, la rápida mengua de los sentimientos eufóricos mientras la concentración de cocaína en el plasma sigue siendo todavía alta quizá se deba a la disminución de la capacidad de respuesta de las partes receptoras una vez han sido ya ocupadas, de suerte que se da la apariencia de tolerancia aguda a la droga.

Otra razón de que los sentimientos de euforia aumenten y disminuyan con tanta rapidez mientras sigue siendo alta la concentración de cocaína en el plasma sanguíneo quizá sea que la cocaína es fácilmente soluble en el tejido adiposo. En virtud de esta solubilidad, la cocaína podría trasladarse muy de prisa de la corriente sanguínea al cerebro; hay pruebas de que la concentración de cocaína es mucho mayor en el cerebro que en el plasma. Si la gran concentración inicial de cocaína en el plasma lleva a una alta concentración en el cerebro, la nivelación subsiguiente se lograría si la cocaína redundara saliendo del cerebro e introduciéndose nuevamente en el plasma. Así, la concentración plasmática permanecería alta aún después de que la cocaína empezase a refluir del cerebro. Por tanto, lo que se sabe acerca de la relación entre la concentración en el plasma y la euforia es al menos consistente con la hipótesis de que la euforia inducida por la cocaína está muy vinculada a su concentración en el cerebro.

Los efectos de una droga dependen de las pautas de comportamiento a largo plazo del individuo con respecto a esa droga, así como de los distintos fenómenos que en él puedan observarse depués de una sola dosis. El uso crónico de una droga puede tener consecuencias sociales y farmacológicas. Si una persona llega a estar totalmente interesada en la adquisición y en el consumo de una droga, es posible que su estructura vital cambie enteramente. Cuando se toma con regularidad cocaína, esta puede causar insomnio y pérdida del apetito; a consecuencia de dosis altas o del consumo inveterado, puede experimentar el consumidor un estado de ansiedad paranoide. Sigue siendo cuestión por decidir si la cocaína es o no causante de psicosis auténticas, pero cada vez hay más motivos para pensar que, si se toman frecuentemente grandes dosis de la droga, pueden producirse alucinaciones y paranoia.

¿Es adictiva la cocaína? La pregunta parece pedir una respuesta sencilla, pero el contestarla con un sí o con un no en modo alguno hace justicia a la maraña de problemas de definición médica, sabiduría popular, clasificación legal y recriminación social que se resumen mediante el vocablo "adictiva". Una antigua definición del término, médicamente aceptada, se deriva de la descripción de los efectos narcóticos. Para que a una droga se la considere adictiva es menester que una persona muestre tolerancia respecto a esa droga, en el sentido de que la misma dosis, repetida, le vaya causando una respuesta cada vez menor. Más aún, la droga



LOS SENTIMIENTOS DE DISFORIA siguieron a la inicial euforia en sujetos experimentales que fumaron pasta de cocaína, aun cuando la concentración de cocaína en el plasma permanecía relativamente alta. La disforia se caracteriza por ansiedad, depresión, fatiga y avidez de más cocaína. La euforia probablemente alcance su máximo poco antes de que la concentración en el plasma llegue a su punto más alto, pero las primeras mediciones psicológicas se hicieron con posterioridad al análisis del plasma. La secuencia temporal de los valores máximos aquí mostrada no puede, pues, considerarse definitiva.

ha de llevar a la dependencia física, de modo que se requiere repetir las dosis para evitar que se origine un síndrome de abstinencia.

Conforme a esta definición, la cocaína no es adictiva. Sus usuarios pueden tomar diariamente la misma dosis y lograrán el mismo efecto. Hay signos de abstinencia detectables en el electroencefalograma y en las pautas del sueño, pero no son nada dramáticos en comparación con los síndromes de abstinencia asociados a los narcóticos, a los barbitúricos y al alcohol.

Por otro lado, la cocaína es ciertamente adiccionante en el sentido más amplio del término, que es el adoptado hoy por muchos farmacólogos. En efecto, la cocaína es gravemente habituadora. Dentro de este contexto, al consumo crónico de cocaína por vía nasal debe distinguírselo de su inyección regular y de fumar la "libre base". La dependencia respecto a la cocaína intranasal se manifiesta en la forma de un uso continuo mientras se dispone de suministro y en la de simple abstención cuando el suministro falta. El patrón de comportamiento es comparable con el experimentado por mucha gente en relación con los cacahuetes o con las patatas fritas. Puede impedir otras actividades del individuo, pero puede ser también una fuente de disfrute.

En contraste con esto, el fumar cocaína o el inyectársela puede llevar a un comportamiento de casi continuo consumo e incesante demanda de la droga, comportamiento destructivo de la integridad y la productividad de la persona. Fumar la libre base es, probablemente, peligroso también para el sistema respiratorio, pues constringe los vasos sanguíneos de los pulmones. El elevado precio de la cocaína callejera, junto con lo relativamente grandes que son las cantidades de la sustancia que se necesitan para las inyecciones o para fumar la libre base, contribuyen sin duda a limitar el daño que las gentes podrían, si no, infligirse a sí mismas.

La existencia de un considerable aparato burocrático depende de que el público esté convencido de que la cocaína es inequívocamente perniciosa. El Gobierno de los Estados Unidos empleó en el programa de Control de la Droga por todo el mundo a 1950 agentes, con un presupuesto de 227 millones de dólares durante el año fiscal que finalizó en septiembre de 1981. En dicho año los agentes dedicaron el 31 por ciento de sus horas de trabajo investigatorio a cuestiones relacionadas con la cocaína. Miembros de la Oficina de Control están operando en nueve países sudamericanos, en todos los cuales, excepto en Colombia (donde constituye también un problema el tráfico de marihuana), el asunto principal es la cocaína.

Por otra parte, el Departamento de Estado ha desplegado una gran actividad diplomática para persuadir a los gobiernos de esos países a que adopten las medidas deseadas por los Estados Unidos en lo tocante al cultivo de la coca y al reforzamiento de las leyes que rigen el comercio de la cocaína. Los Estados Unidos acaban de firmar tratados en los que Perú y Colombia se comprometen a erradicar la coca; con Bolivia aún no se han establecido tales acuerdos. Los convenios de las Naciones Unidas para limitar el incremento de la producción de coca en Perú y en Bolivia han implicado incentivos económicos y van acompañados de planes para cultivar productos sustitutivos.

No se ve con claridad si el posible abuso de la cocaína justifica tan intensos esfuerzos. Las muertes por el uso recreativo de la cocaína son raras. En las sociedades de los indios andinos los niveles hallados en el plasma sanguíneo son equiparables a los que se encuentran entre quienes toman la cocaína intranasalmente y, sin embargo, son mínimas las pruebas de que el mascar coca produzca daños físicos. En aquellas culturas el uso religioso de la cocaína no puede clasificarse de abuso de droga, y el celo de los esfuerzos erradicadores quizá le prive al indio de un bien tradicional. La principal amenaza que para la sociedad norteamericana y europea supone la cocaína es la pérdida de potencial humano que podría resultar de la difusión de su consumo. La política sobre la cocaína y su regulación apenas tiene en cuenta estas conclusiones, lo mismo que en el pasado las regulaciones acerca de la droga no se basaban ni en la ciencia ni en la opinión. Hemos legalizado el alcohol y el tabaco, que, aunque gratos para algunos, entrañan evidentes riesgos para la salud privada y pública.

La historia nos enseña que la cocaína es una droga de la que fácilmente se abusa. El actual tráfico nos está diciendo que si la demanda es lo bastante grande suele montarse toda una industria para satisfacerla. Desde el punto de vista médico, se trata de una droga relativamente digna de confianza, pero dejada en manos de gentes ingenuas puede llevar a un comportamiento autodestructivo. Muchas de las cuestiones que se plantean en torno a la cocaína pueden responderse mediante la investigación científica, pero las decisiones finales serán políticas y económicas, no científicas.

Temas metamágicos

¿Es arbitrario el código genético? ¿Podría otro código funcionar igualmente bien?

Douglas R. Hofstadter

Todo empezó por culpa de un alumno mío algo sabidillo, llamado Vahe Sarkissian. Estaba yo en mi clase de ciencias de cómputo, largando sobre uno de mis temas favoritos: la semejanza entre la compleja maquinaria de la célula viva, que permite que las moléculas de ADN saquen copias de sí mismas, y la ingeniosa maquinaria matemática que hace posible que una fórmula diga algo acerca de sí. A mi modo de ver, esta semejanza es profunda y fructífera, y me ha permitido adquirir una visión más detallada de ambos campos. Aunque Vahe no negaba la validez de la analogía, sí ponía en cuestión uno de sus aspectos más relevantes, lo que suscitó la discusión en clase. Su escepticismo me obligó a elaborar cuidadosamente el tema, y durante el proceso descubrí algunos aspectos fascinantes de la biología celular que de otra forma quizá nunca hubiese conocido. He descubierto además, y con placer, lo rápidamente que la gente puede llegar a captar esas intrincadas cuestiones aunque no tenga formación previa en biología molecular.

Los dos profundos descubrimientos que la analogía pone en relación se han realizado este siglo; ambos dependen crucialmente de la noción de código, entendida como una aplicación (nombre que los matemáticos dan a las correspondencias unívocas en uno de sus sentidos) de un conjunto de entes en otro. En metamatemática es el código gödeliano, numérico; en biología es el código genético. En un código gödeliano, a los diversos símbolos matemáticos (los paréntesis, por ejemplo) se les asignan números clave, lo mismo que a los coches se les identifica por su número de matrícula, o que en las ciudades se definen distritos postales. Esta correspondencia pone en relación los entes de dos dominios en principio incorrelados, uno tipográfico, otro, abstracto.

Análogamente, el código genético establece una correspondencia entre otro par de dominios también intrínsecamente incorrelados. En esta ocasión, sin embargo, ambos dominios constan de entidades o unidades químicas. A quien no se halle algo familiarizado con la nomenclatura química tal vez no le resulten estos dominios tan absolutamente diferentes como para encontrar llamativa la asombrosa cualidad de su conexión. El hecho subsistente es que en el curso de la evolución llegó a ponerse a punto un dispositivo por el cual una unidad química de una especie fue asignada como "nombre clave" de una unidad de la otra especie. Lo que en realidad se produce es la asignación de *tripletes*, o sea ternas ordenadas de unidades de las que llamaré Especie I, a las unidades de lo que llamaré Especie II. En muchos casos no se asocia un solo triplete, sino varios, pero no es necesario que nos detengamos ahora en ello. Lo esencial es, sencillamente, que los miembros de dos especies de unidades químicas en principio incorreladas quedan en correspondencia unos con otros. La cuestión de Vahe se refiere al grado de arbitrariedad que realmente puede tener esta correspondencia.

La Especie I está compuesta por nucleótidos. La Especie II la forman los aminoácidos. Si tales palabras no pertenecen todavía a su vocabulario, no se deje arrastrar por el pánico. No se requiere conocer ni una sola palabra de química para imaginar la correspondencia, el emparejamiento entre miembros de especies químicas diferentes. Todo cuanto se requiere comprender es que con cada triplete de nucleótidos (sean éstos lo que fueren) está asociado un aminoácido (no importa qué sea). El código genético es la tabla de emparejamiento.

Sería difícil describir el objeto de tal codificación sin decir dos palabras acerca de los constituyentes de la célula. El carácter, la "personalidad" de la célula está almacenada en sus genes. Los genes, sin embargo, son algo esencialmente estático, son como las palabras de un libro. Para cobrar vida han de ser traducidos en agentes dinámicos. Tales agentes dinámicos son las proteínas; sus acciones hacen realidad el potencial de los genes. Al dar "expresión" a los genes crean el carácter de la célula. Los genes son cadenas de nucleótidos; las proteínas son cadenas de aminoácidos. La personalidad de la célula está escrita, según lo dicho, en unidades químicas pasivas, de la Especie I. Por intermedio del código genético tal descripción puede materializarse en una vasta población de agentes dinámicos de la Especie II. Gracias al código genético, la personalidad de la célula, implícitamente definida por sus genes, puede aflorar y florecer.

Hay 20 aminoácidos distintos, y por tanto, pudiera pensarse que debieran existir otros 20 tripletes distintos de nucleótidos. Pero no es tan sencillo. Resulta que en el código genético intervienen cuatro nucleótidos distintos, que se denotan A, C, G y U (adenina, citosina, guanina y uracilo). Cada uno de los tripletes posibles (comenzando por AAA, AAC, AAG, y así hasta UUU) se traduce en algún aminoácido. (Bueno, no es así del todo; hay tres que no, mas por el momento no entraré en esos detalles.) ¿Cuántos tripletes hay? Evidentemente, $4 \times 4 \times 4$, o sea, 64. Por consiguiente hay $61 = 64 - 3$ tripletes que emparejar con 20 aminoácidos, lo que conlleva que algunos aminoácidos estén representados por más de un "codón" (triplete de nucleótidos). Concretamente, ciertos aminoácidos están asociados con seis codones diferentes, otros están asociados con cuatro, hay algunos representados por tres y algunos por dos; únicamente dos aminoácidos están representados por un solo codón. Para comodidad del lector, el código genético completo está reproducido en la ilustración de la página 114.

Volvamos con Vahe. Este hacía notar que el esquema de codificación numérica de Gödel es totalmente arbitrario. Kurt Gödel pudo haber asociado prácticamente cualquier número a cada uno de los símbolos matemáticos implicados sin que ello afectase lo más mínimo al éxito de su trabajo. Tal observación es perfectamente correcta. Por otra parte, Vahe tenía la convicción de que el código genético está inspirado en una idea más profunda. Sentía intuitivamente que cada aminoácido está relacionado con su codón o codones particulares por alguna razón inexorable, por alguna razón química fundamental que impone la necesidad de la relación. Para caricaturizar la posición de Vahe pudiéramos decir: "El trabajo de Gö-

del es tan sólo la obra de un mortal, pero el código genético es obra de Dios. Por consiguiente, el código genético ha de ser perfecto, inevitable e inalterable".

No tardé en replicar que, hasta donde yo tenía noticia, no sucedía así. Contesté que el código genético parece ser punto por punto tan arbitrario como la codificación de Gödel o la numeración de los distritos postales o la codificación telefónica. Tracé en la pizarra algunos diagramas de las moléculas correspondientes con el fin de poner de manifiesto mis razones para creerlo así. Pero estando al pie de la pizarra algunas cuestiones empezaron a mellar mi seguridad, empecé a darme cuenta de que no tenía certeza absoluta en alguna de las cosas que estaba diciendo, de que tendría que cerciorarme de ciertos "hechos". El deseo de probar a mis alumnos la naturaleza arbitraria del código genético me ha conducido por algunas de las más fascinantes sendas de la biología molecular; de algunos de estos hallazgos me propongo dejar reseña aquí.

Volvamos a la célula. Las células son pequeños hervideros de actividad, algo así como ciudades en miniatura. En tales ciudades hay fundamentalmente dos tipos de objetos. Unos son pasivos, "ladrillos" abandonados por ahí en espera de que alguien haga algo con ellos, mientras otros son agentes activos, "obreros" inquietos ansiosos por meter baza en todas partes y hacer algo. En su mayor parte, estos agentes activos son "enzimas". Cada enzima tiene su papel específico que desempeñar, que realiza sobre "materiales" de un tipo determinado, que suelen ser del tipo "ladrillo", pero que pueden ser también otros enzimas. De cuál sea su forma concreta de actuar no es momento de tratar ahora. Nos bastará sencillamente admitir que los enzimas hacen su trabajo, tanto si éste consiste en escindir algún elemento pasivo como si consiste en soldar dos o más de ellos, o realizar algún otro proceso químico.

Uno de los más maravillosos rasgos de las células es que tan elegante es su diseño que para muchos propósitos podemos olvidarnos de la química y fijarnos únicamente en la lógica que inspira sus procesos. Más aún, no siendo yo especialista en bioquímica, tan sólo puedo enfocar los fenómenos celulares desde ese ángulo. Aunque dé nombre químico a sus ingredientes, la imagen profunda que de ellos me hago pocos componentes químicos contiene. En realidad, yo sólo imagino una serie de minúsculos cuerpos que por alguna razón casi mágica se comportan de ciertas maneras especificadas en los libros de bioquímica. La idea que me hago de los cuerpos químicos implicados en los procesos vitales viene a ser la que mucha gente se hace de los coches: saben cómo conducirlos en (casi) todas las situaciones, pero en realidad no comprenden verdaderamente cómo funcionan. Aunque me resulte estimulante flirtear con términos técnicos de la bioquímica, lo único que comprendo en realidad es su organización lógica. (Albert L. Lehninger la llama "lógica molecular del estado viviente".) No es la menor de las bellezas de la bioquímica que impunemente pueda cometerse desmán semejante; tal belleza estamos festejando aquí.

Los enzimas son sencillamente proteínas de un tipo especial. Y todas las proteínas son moléculas curiosamente retorcidas y enovilladas, compuestas por aminoácidos. Esta característica es esencial. He aquí como lo veo yo. Imaginemos primero un gran número de aminoácidos enlazados y acoplados como los vagones de un tren (al igual que los vagones, los aminoácidos tienen enganches que les permiten enlazarse por sus extremos con otros aminoácidos y formar cadenas de longitud arbitraria). Yo imagino después que mantengo tensa entre las manos esta larga cadena de aminoácidos, como si fuera una cinta de goma. Suelto ahora un extremo del elástico y ¡sproing! esta especie de bicho medio loco se repliega y acurruca sobre sí mismo hasta formar rápidamente una suerte de ovillo del tamaño de un puño. Pruebe usted ahora. Sujete con los dedos los extremos del ovillo, que estarán perdidos por medio de la bola, y vaya estirando lentamente. La cadena de prótidos se resiste, desde luego, pero si la operación se ejecuta suavemente, sin tirones, es posible desenrollarlo completamente sin romperlo. ¿Lo ha logrado estirar del todo? Suéltelo ahora. ¡Sproing! ¿Se ha fijado? Ha vuelto a tomar exactamente la misma forma que antes. Devuélvamelo ahora. Muchas gracias.

Parece como si a las proteínas les gustase acurrucarse y hacerse ovillos. Esta forma tridimensional es lo que se denomina su estructura terciaria. La estructura terciaria de cada tipo de proteína es única, y queda determinada sin ambigüedad por la secuencia de sus aminoácidos; por ello, cada vez que la proteína se repliega adopta siempre la misma forma. La secuencia unidimensional de aminoácidos define la estructura primaria de la proteína. Podemos decir entonces que la estructura primaria de las proteínas determina su estructura terciaria. (Ciertas proteínas tienen también una estructura secundaria, un grado de arrollamiento intermedio, semejante al cable del teléfono; no obstante, en las proteínas lo esencial es su estructura terciaria.)

¿Y qué si las proteínas tienen estructura terciaria? ¿Qué puede importar que se replieguen o no? La respuesta es que tal forma replegada determina qué tipo de agente activo es la proteína. (En caso de ser agente. Hay proteínas que no son agentes, no son enzimas, sino meros ladrillos. De ahora en adelante me referiré exclusivamente a los enzimas.) La estructura terciaria de un enzima está caracterizada por ciertas protuberancias y huecos, algo así como las narices y orejas del rostro de las personas, si bien las diferencias entre enzimas son más radicales que las diferencias de rasgos faciales, aparte de mucho más complejas. Ciertas partes de los enzimas se denominan sitios activos, pues por ellos se acoplan, como una sanguijuela, a los ladrillos sobre los que van a actuar.

Justamente gracias a la adaptación entre los sitios activos y la forma del ladrillo-diana es cómo el enzima consigue "averiguar" a qué debe acoplarse. El

Alanina	Ala
Arginina	Arg
Asparagina	Asn
Acido aspártico	Asp
Cisteína	Cys
Glutamina	Gln
Acido glutámico	Glu
Glicina	Gly
Histidina	His
Isoleucina	Ile
Leucina	Leu
Lisina	Lys
Metionina	Met
Fenilalanina	Phe
Prolina	Pro
Serina	Ser
Treonina	Thr
Triptófano	Trp
Tirosina	Tyr
Valina	Val

Los 20 aminoácidos

Adenina	A
Guanina	G
Uracilo	U
Citosina	C

Los cuatro nucleótidos

enzima y el substrato (el ladrillo) suelen compararse a una llave y su cerradura. Ningún substrato, salvo el idóneo, encajará correctamente. (En realidad, bajo circunstancias especiales sí puede ocurrir así, pero no es éste momento de entrar en detalles.)

Los enzimas son muy específicos. Están hechos a la medida para ejecutar una tarea concreta y nada más. A partir del momento en que un enzima se acopla a un substrato comienza a sacudirlo y agitarlo, como una lavadora a la ropa. El enzima puede desmembrar partes de un substrato y ligarlas a otro, puede encadenar dos substratos...; sea cual sea su tarea, realiza el trabajo encomendado. Después, deja libre al producto o productos, que pueden así desplazarse a la deriva por el interior de la célula.

El resultado de toda la frenética actividad desarrollada por millares de enzimas es la creación y sostenimiento de un organismo viviente único. Son estos enzimas, estas proteínas, estas cadenas arrolladas de aminoácidos quienes ejecutan el plan maestro trazado por los genes de la célula, que a su vez son cadenas de... ¡Alto! ¡Un momento! ¡Todavía no hemos llegado ahí!

Para comprender la célula nada mejor que conocer el funcionamiento de los enzimas. Son ellos quienes la hacen trabajar. Queda, empero, otra cuestión de importancia igual, a saber, qué enzimas hay en ella, y por qué se encuentran allí. No todas las células tienen la misma dotación enzimática, y por eso no todas tienen iguales características. Más todavía, el equipo enzimático de las células puede cambiar en razón de circunstancias internas o externas. ¿De dónde proceden los enzimas? En última instancia, de los genes, evidentemente, que son como los planos del edificio celular, pero tal respuesta de poco nos sirve en este punto. Lo que necesitamos es comprender cómo se realiza efectivamente la construcción de los enzimas, y no dónde se encuentran archivadas las instrucciones de montaje.

Recordemos que los enzimas son proteínas, y que las proteínas son largas cadenas de aminoácidos conectados por sus extremos y hechos ovillos. Podría pensarse que siendo los enzimas tan hábiles para desguazar y recomponer moléculas orgánicas, serían ellos los encargados de construir las proteínas. Sin embargo, esta tarea es tan delicada, tan específica y única, que para realizarla la célula dispone de un mecanismo específico de otro tipo: los ribosomas. Los ribosomas están compuestos en parte por proteínas y, en parte, también por nucleótidos. Su composición exacta no tiene por qué interesarnos aquí; después de todo, tan sólo estamos interesados en la organización *lógica* de la célula.

¿Habrá un ribosoma específico para cada tipo de proteína? No podrá ser, pues se caería entonces en una recurrencia infinita. Pues, ¿quién se encargaría entonces de fabricar a cada uno de los ribosomas? ¿Un metarribosoma? ¿Y a éstos? En realidad los ribosomas no son específicos para las proteínas, y nada saben de las que construyen. Un ribosoma es sencillamente una especie de acoplador universal de aminoácidos. Se sigue que algo debe decirle al ribosoma qué aminoácidos debe ensamblar y en qué orden. ¿Pero qué? Por ejemplo, supongamos que hayan de enlazarse lisina-leucina-glicina-prolina-cisteína-histidina-triptófano. (He elegido esta secuencia tan sólo por la musicalidad de sus nombres. Para ser una verdadera proteína la secuencia es demasiado corta. Por lo común las proteínas tienen una longitud de muchas docenas de aminoácidos, lo mismo que esos interminables trenes de mercancías que parecen cruzar junto a la habitación de nuestro hotel siempre que tenemos que hacer noche fuera de casa.) ¿Qué le dice al ribosoma que debe comenzar con lisina y terminar con triptófano?

A riesgo de parecer recurrir a una iteración infinita, revelaré ahora que hay *otro* tren, compuesto éste por unidades químicas de la Especie I, o sea, nucleótidos. Este tren atraviesa el ribosoma por el medio, lo mismo que el mercancías atraviesa una estación. Sus vagones, tomados de tres en tres, le dicen al ribosoma qué aminoácido deberá ir en primer lugar, cuál en segundo, etcétera. Este es el tren correo que gracias al código genético le dice al ribosoma cuál será el aminoácido siguiente.

El tren se llama ácido ribonucleico mensajero (ARNm). Una molécula de ARNm es una larga sucesión de A(deninas), C(itosinas), G(uaninas) y U(racilos). Las cadenas de ARN son más largas, incomparablemente más, que las cadenas de proteínas, pudiendo muy bien estar formadas por millares de nucleótidos enlazados como las cuentas de un collar. Cada cadena de ARNm tiene intercaladas diversas marcas que especifican dónde comienza y dónde termina la codificación de cada proteína. Por eso hay tres codones especiales que no representan aminoácidos, sino que traducen la cualidad de "furgón de cola". Le dicen al ribosoma: "¡Corta inmediatamente esa proteína! ¡Ni un aminoácido más!".

Estamos llegando a la cruz de la cuestión. ¿Dónde está almacenado el código genético? Quizá de mis palabras se sobrentienda que los ribosomas "conocen" el código, pero no es así. A pesar de que los ribosomas hacen la traducción, no conocen ninguno de los idiomas que utilizan. ¿Cómo es posible?

Imagine que se encuentra en las Naciones Unidas. El Sr. Na, pintoresco

PRIMERA POSICION	SEGUNDA POSICION				TERCERA POSICION
	U	C	A	G	
U	Phe	Ser	Tyr	Cys	U
	Phe	Ser	Tyr	Cys	C
	Leu	Ser	Paro	Paro	A
	Leu	Ser	Paro	Trp	G
C	Leu	Pro	His	Arg	U
	Leu	Pro	His	Arg	C
	Leu	Pro	Gln	Arg	A
	Leu	Pro	Gln	Arg	G
A	Ile	Thr	Asn	Ser	U
	Ile	Thr	Asn	Ser	C
	Ile	Thr	Lys	Arg	A
	Met	Thr	Lys	Arg	G
G	Val	Ala	Asp	Gly	U
	Val	Ala	Asp	Gly	C
	Val	Ala	Glu	Gly	A
	Val	Ala	Glu	Gly	G

El código genético. Ejemplo de lectura: C **(izquierda)**, *A* **(arriba)** *y G* **(derecha)** *son una de las claves de Gln (glutamina)*

PROTEINA		Phe	Val	Asn	Glu	Asp	Leu	Cys	Gly	Ser	
ARNm	C	U U U	G U U	A A U	G A A	G A U	U U A	U G U	G G U	A G U	A

Los aminoácidos de una cadena proteínica **(arriba)** *están codificados por tripletes de nucleótidos en el ácido ribonucleico mensajero (ARNm),* **(abajo)**

embajador de Nucleotidia, está a punto de pronunciar un importante discurso. Una traductora de gran capacidad, la Sra. Mari Boso, ha sido llamada para servir de intérprete. Sin embargo, la Sra. Boso ignora en qué idioma será pronunciado el discurso, ni sabe tampoco a qué idiomas tendrá que traducirlo. La cosa presenta feo aspecto. En el último momento, un instante apenas antes de comenzar el discurso, un equipo de rescate entra a toda velocidad en la cabina de traducción y cuelga del techo un gran número de tarjetas de señales. Cada tarjeta porta en su anverso una palabra del idioma nucleotídico (curiosamente, todas ellas de tres letras) y en el reverso, su significado en lengua-objeto, que resulta ser el aminoacídico. ¡Mari Boso está salvada! Todo cuanto ha de hacer es escuchar con atención al Sr. Na, y después, cada vez que oiga una palabra, buscar como un rayo la tarjetita que la contiene. Una vez encontrada, diestramente la vuelve para leer su traducción aminoacídica en el micrófono que tiene frente a sí. ¡Otra palabra, por favor!

No es cansado ser ribosoma. Todo cuanto se requiere es ser capaz de atinar con la tarjeta correcta en un abrir y cerrar de ojos. Pero, ¿acaso hay tarjetas de señales en la célula? Y de ser así, ¿qué son? Parece en este punto como si el código genético hubiera pasado un poco a segundo plano; se ha hecho más descentralizado, más difícil de localizar. Mientras al principio hubiéramos podido sospechar que el código genético se albergaba en los ribosomas, ahora parece residir en las tarjetas de señales. Por tanto, si queremos averiguar el grado de arbitrariedad del código genético tendremos que determinar si es posible cambiar las tarjetas de señales, y en caso afirmativo, cómo.

Las tarjetas de señales celulares son los ácidos ribonucleicos de transferencia (ARNt). La nomenclatura sugiere que estos ácidos están formados por los mismos componentes del ARNm: A, C, G y U. Así es, en efecto, salvo en que ciertos nucleótidos son ocasionalmente modificados por enzimas, detalles finos que para nuestros propósitos podemos dejar de lado. En su nacimiento, un ARNt es sencillamente un pedazo de ARN. Después, y a diferencia del ARNm, que permanece alargado y serpeante, el ARNt se repliega y ovilla como una proteína, adoptando una estructura terciaria específica; conducta que contrasta con la del ARNm, que sólo forma bucles y sinuosidades sin finalidad concreta y en tramos cortos. La ondulación del ARNm no es funcional, mientras que la del ARNt sí lo es. Todos los ARNt se repliegan sensiblemente de la misma forma: una especie de *L* regordeta, como el brazo de Mr. Universo en las fotografías. A nivel más detallado, las estructuras terciarias de los ARNt son, sin embargo, diferentes.

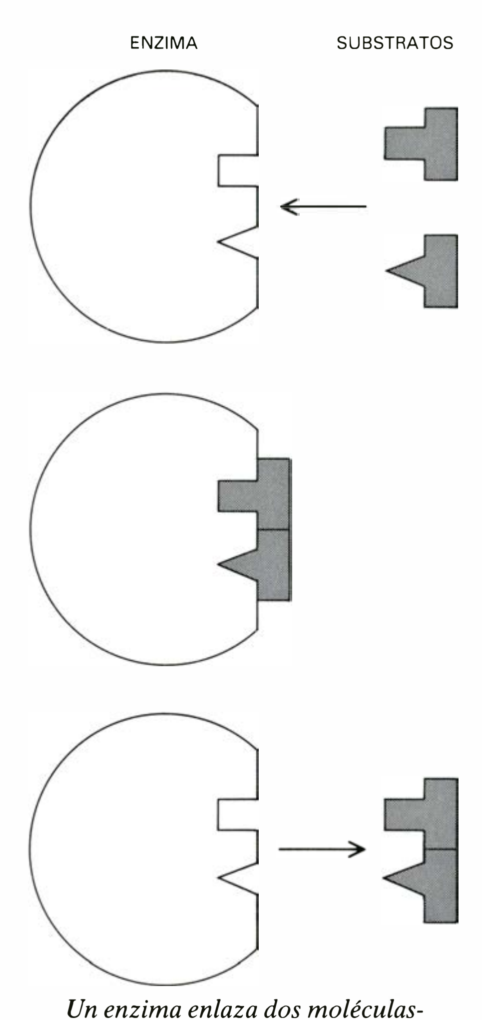
Una vez replegada, la molécula del ARNt actúa como una tarjeta de señales, en el sentido de que porta un aminoácido en el extremo de uno de los brazos de la *L* y un codón en el otro. En realidad no se trata de un codón, sino de un anticodón, pero a nuestros fines podemos considerarlos como las dos caras de una moneda. Para cada codón hay un anticodón correspondiente, y al revés. Para deducir uno del otro basta intercambiar A y U, C y G. Por eso se dice que A y U son complementarios, y lo mismo C y G. Así pues, el anticodón de CUC será GAG, y el anticodón de GAG vuelve a ser CUC. Más explícitamente: en el ARNt uno de sus extremos es un anticodón. El otro es un punto de acoplamiento de aminoácidos.

En dos palabras, los ribosomas son dispositivos de traducción entre dos lenguajes intracelulares, el nucleotídico y el aminoacídico. En uno de ellos las palabras son codones; en el otro, aminoácidos. El ARNm es un largo discurso cuyas frases están escritas en nucleotídico. Los ribosomas son sistemas de traducción simultánea, veloces y eficientes, que se valen de moléculas de ARNt para ensamblar proteínas, que son traducciones literales, palabra por palabra, del lenguaje nucleotídico al de los aminoácidos. ("Veloz" significa lo siguiente: en condiciones normales, los ribosomas de una célula bacteriana pueden traducir unos 20 codones por segundo. En las células del conejo son más lentos: algo más de un codón por segundo.)

El "discurso" del ARNm está continuamente "sonando" en el ribosoma, quien lo recibe y descifra paso a paso, a razón de un codón cada vez. Al encontrar un nuevo codón el ribosoma ha de atinar con un ARNt que se acople con él, un ARNt cuyo anticodón se corresponda con el codón. Como es obvio, los ribosomas no tienen ojos y no pueden ir inspeccionando las señales que lo rodean, como haría Mari Boso. No; tiene que ir ensayando un ARNt tras otro, hasta dar con uno que se le amolde y acople exactamente, de igual forma que el Príncipe localizó a Cenicienta por sus zapatito. Es un misterio cómo los ribosomas consiguen atinar tan rápidamente con un ARNt complementario. En cualquier caso, una vez descubierto uno, y tras haber abrochado en posición correcta su anticodón con el codón del ARNm, el ribosoma cercena el aminoácido del ARNt y lo suma a la cadena proteínica en formación; después dejan en libertad al ARNt "desnudo", que puede así atrapar un nuevo aminoácido.

Y aquí aparece una notable diferencia entre las tarjetas de señales del símil y las moléculas de ARNt. Pues mientras las tarjetas podrían usarse repetidamente sin ninguna condición, cada vez que una molécula de ARNt ha sido utilizada hace falta "recargarla" con el aminoácido adecuado. ¿Dónde y cómo se produce la recarga? ¿Con qué aminoácido ha de recargarse? ¿Cómo se determina? ¿Qué lo determina? Súbitamente todas estas cuestiones adquieren gran importancia. Volveremos a ellas.

Ya resulta evidente que si el código genético se encuentra almacenado en algún lugar, lo está de forma descentralizada, distribuido entre los miles de ARNt que flotan en suspensión en el entorno de los ribosomas. ¿No habrá alguna forma de subvertir estos ARNt? ¿No podrían conducir falsamente el proceso de traducción? Desde luego, podríamos concebir que el equipo de emergencias de la ONU se hubiera confundido de juego de tarjetas, provocando así que desde su cabina la Sra. Boso tradujera el discurso del Sr. Na a un idioma totalmente inadecuado. ¿Sería concebible que se produjera un sistema completo de "ARNt subversivos", es decir, de ARNt acoplados con aminoácidos indebidos, capaces de engañar a



Un enzima enlaza dos moléculas-substrato

los ribosomas e inducirles a fabricar proteínas absurdas? ¿Cómo podría perpetrarse una broma tan pesada y de tan mal gusto?

A este nivel me encontraba yo cuando empecé a trazar en la pizarra dibujos para mis alumnos. Bosquejé una molécula de ARNt típica, y afirmé que uno de sus extremos –el extremo *AA*– atraería un aminoácido determinado. ¿Pero por qué habría de atraer al aminoácido *idóneo*? Es bastante sencillo, pensé para mí. Como sucede en la mayoría de las afinidades químicas intracelulares, el extremo *AA* del ARNt sin duda tendría la *forma adecuada*. Según esto, cada ARNt tentaría únicamente a su aminoácido correspondiente (de acuerdo con el código genético) a su anticodón. Así pues, estaba yo suponiendo que, para cada anticodón, el ARNt que lo portase tendría diferente configuración en su extremo *AA*, y así fue lo que dibujé en la pizarra: una molécula de ARNt con un anticodón específico en un extremo y una "configuración atractiva" específica en el otro extremo, configuración que presumiblemente se combinaría tan sólo con un tipo particular de aminoácido.

Y aquí se plantea una cuestión difícil. ¿Por qué atrae cada ARNt al aminoácido *idóneo* para su anticodón, siendo el "idóneo" el definido por el código genético? ¿Por qué no habría algún ARNt de replegarse de forma tal que atrajese algún otro aminoácido? ¿Existe acaso alguna conexión intrínseca entre los dos extremos del ARNt? Por ejemplo, ¿es el anticodón capaz de decirle de alguna manera al otro extremo en qué forma debe replegarse? Esta era una de las ideas que tenía Vahe.

Yo expliqué a la clase que ninguno de los extremos del ARNt sabe lo más mínimo acerca del otro. Podríamos por medios quirúrgicos sustituir el anticodón por algún otro, y el extremo *AA* no acusaría la diferencia. Recíprocamente, se podría reseccionar la punta especialmente configurada *AA* e implantar otra punta ajena, que atraería entonces a un aminoácido incorrecto, y de esta forma el ARNt impersonaría un elemento falso del código genético. Terminé diciendo: "Puesto que los dos extremos de cualquier ARNt son independientes, en principio sería posible subvertir el código genético, que por consiguiente es arbitrario". Me soplé la tiza de las manos y pasé a otro tema.

Bueno, pues resulta que el cuadro que había trazado es sólo correcto en espíritu, pero no en sus detalles. Todas las moléculas de ARNt tienen en su extremo *AA* exactamente la *misma* estructura. Por ejemplo, los tres últimos nucleótidos del extremo *AA* son siempre CCA. Por consiguiente, el lugar donde se acopla el aminoácido es totalmente inespecífico. ¡No hay ninguna afinidad química entre el extremo *AA* de un ARNt y el aminoácido que va a recibir! Al enterarme de esto, una vez terminada la clase, quedé no poco confundido. ¿Cómo es posible, me preguntaba yo, que el ARNt termine siempre con el aminoácido correcto ligado a él? ¿Qué causa lo conduce allí? ¿Pudiera ser el anticodón, no obstante hallarse en el otro extremo de la molécula? Y de ser el anticodón, ¿significa esto que después de todo sí hay algún enlace especial e intrínseco entre el anticodón y su aminoácido asociado? ¿Acaso el código es inevitablemente el que es?

Hallé la respuesta conversando con los amigos y consultando libros. Para mi tranquilidad venían a darme la razón, si bien la sutileza de los procesos era mucho mayor de lo que había sospechado. Aunque el extremo *AA* es indiferente al aminoácido que en él atraca –con lo que en principio puede recibir cualquier aminoácido– en circunstancias normales solamente quedará ligado a él un tipo especial de aminoácido. Ello no es debido al anticodón, sino a la estructura terciaria de otra región del ARNt: el bucle DHU. Se trata de un bucle que toda molécula de ARNt contiene, y que se curva de forma característica para cada uno de ellos. El bucle DHU es por tanto una especie de "firma" tridimensional gracias a la cual el tipo concreto de ARNt de que se trate puede reconocerse desde el exterior.

Mas, ¿qué podrá efectuar tal identificación? Pues un enzima, desde luego, del tipo conocido por amino-acil-ARNt-sintetasa. Tal enzima dispone de dos sitios activos. Uno de ellos es el encargado de reconocer la firma tridimensional del ARNt. El otro sitio activo es un "muelle de amarre" de aminoácidos. A diferencia del extremo *AA* del ARNt, este sitio *no* permanece insensible ante el aminoácido; por el contrario, sólo recibirá a uno específico, el determinado por el anticodón del ARNt. Más aún, la sintetasa propiamente dicha nunca se fija en el anticodón. Todo cuanto hace es "olfatear" los bucles DHU de diversos ARNt, hasta encontrar uno "de su agrado". Entonces liga fuertemente el aminoácido que porta al ARNt, y cortésmente se despide. Para cada aminoácido hay una o varias sintetasas.

Encontramos así algo curioso. Hay flotando por la célula moléculas cuya finalidad es instruir al ARNt y enseñarle el código genético. Cargan a cada ARNt con un pequeño fardo, y después lo dejan vagar a suerte hasta encontrar por ahí un ribosoma. ¿Puede decirse entonces que los ARNt conocen el código genético?

Tampoco. Es necesario instruirlos en él. ¿Qué los instruye? Las sintetasas. ¿Puede decirse entonces que las sintetasas conocen el código? No, no lo conocen. Ellas únicamente emparejan bucles DHU de diversas formas con aminoácidos. Por tanto, en último extremo encontramos que en la célula *nada* hay que conozca el código genético.

Sin duda he exagerado un poco. La verdad, nuevamente, es que el "conocimiento" del código genético está difundido por doquier en la célula; está compartido por el sistema de ARNt y sintetasas, pero ninguno de los sistemas puede atribuírselo solo a sí. Y sin embargo, hay un lugar donde sí podría sostenerse que el código genético está almacenado completo y de una pieza, a saber, el ADN. Tal vez el lector estuviera preguntándose cuándo iba a aparecer el ADN, que por lo común es el hada madrina de todos los cuentos de biología molecular. Bien: el momento ha llegado.

Podríamos imaginar al ADN como una molécula grande y oronda, especie de perezoso patán, repantigado y fumando un puro. El ADN jamás hace nada por sí mismo. Lo único que hace es lanzar órdenes, sin condescender nunca a intervenir directamente. Es algo así como una abeja reina. ¿Cómo logró hacerse con un trabajo tan cómodo? Garantizando la producción de ciertos enzimas, que a su vez le hacen todos los trabajos sucios. ¿Y cómo logra garantizar la producción de determinados enzimas? ¡Ah! ¡Ahí está el truco!

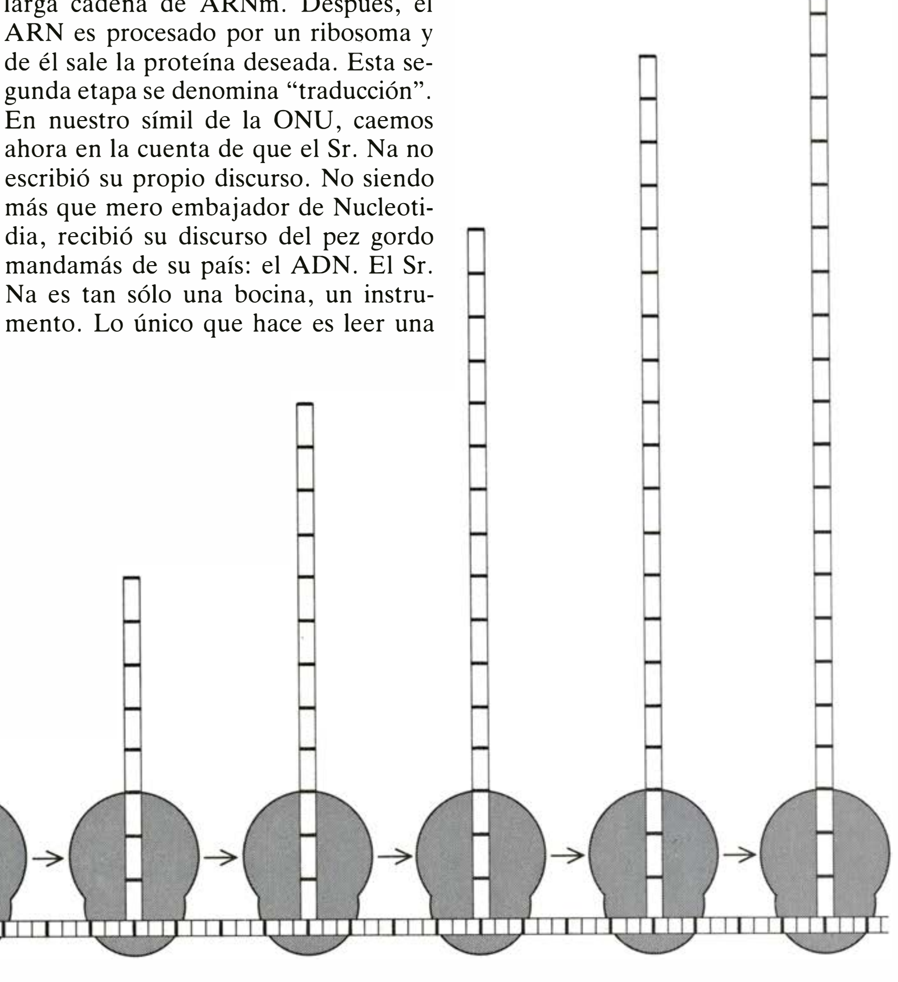
El ADN es un juego de planos e instrucciones para la fabricación de todos los tipos de componentes celulares, tanto activos como pasivos. Si se quiere saber de dónde procede alguno de los elementos de la célula, lo más probable es que la respuesta sea: está codificado en el ADN. La porción de ADN que contiene codificada una determinada entidad se llama gen de la entidad. La entidad puede ser una proteína, o una molécula de ARNt, o puede ser un cierto ARN que finalmente llegue a formar parte de un ribosoma. Sea cual fuere el componente, en la larga molécula helicoidal del ADN estará el gen correspondiente. Esta es la razón de la enorme longitud de la molécula de ADN. En una sencilla bacteria, la longitud del ADN puede alcanzar el millón de nucleótidos; ¡en un ser humano quizá sea miles de veces mayor!

Lo que nos hace volver al tema de los nucleótidos. El ADN, lo mismo que el ARN, está formado por nucleótidos, pero en lugar de uracilo (U) en él se encuentra timina (T). En el ADN, A y T son complementarios, y lo mismo C y G. Para cada filamento de ADN hay otro filamento complementario que se enrolla a su alrededor, dándole a la enorme supermolécula el aspecto de una doble enredadera. La razón de que el ADN adopte esta configuración y el ARN no es que A y U no se acoplan tan íntimamente como A y T, y por ese motivo las hélices que en potencia podría formar el ARN no son tan estables como las del ADN. El ARN puede formar hélices dobles durante tramos cortos, pero no en segmentos largos. También por eso los ARN tienen horquillas y asas arrolladas en doble hélice, pero no forman doble hélice de un extremo a otro.

Ya mencioné al principio que el gen de una entidad es una versión *codificada* de la entidad. Ahora, donde hay codificación tiene que haber decodificación. La decodificación del ADN consta de dos niveles o estadios. Ante todo se decodifica en ARN. Ello se logra por simple complementación: A significa U, T se convierte en A, y C y G se permutan entre sí. El segundo nivel de decodificación consiste en descifrar el mensaje contenido en el ARN. Esa es, desde luego, la tarea de los ribosomas.

Si la célula desea construir, pongamos por caso, una molécula de ARNt, usa únicamente la primera etapa de decodificación ("transcripción"). Localiza el gen del ARNt correspondiente y le pide al enzima de decodificación de ADN (una ARN polimerasa) que manufacture el segmento de ARN complementario al gen. Cuando la célula precisa de una molécula de proteína emplea ambas etapas. Primero, como antes, la célula hace que una ARN polimerasa transcriba el gen correspondiente a la proteína. Se origina así una larga cadena de ARNm. Después, el ARN es procesado por un ribosoma y de él sale la proteína deseada. Esta segunda etapa se denomina "traducción". En nuestro símil de la ONU, caemos ahora en la cuenta de que el Sr. Na no escribió su propio discurso. No siendo más que mero embajador de Nucleotidia, recibió su discurso del pez gordo mandamás de su país: el ADN. El Sr. Na es tan sólo una bocina, un instrumento. Lo único que hace es leer una transcripción del discurso del ADN, que la Sra. Boso traduce luego servilmente al lenguaje de los aminoácidos, conforme le van diciendo las tarjetas de señales del código genético. ¡E incluso las tarjetas fueron dictadas por el mandamás! ¿Comprenden lo que quiero decir al afirmar que el perezoso ADN está al mando de todo?

El ADN contiene en sí versiones codificadas de todas las moléculas de ARNt, de todas las sintetasas y polimerasas, por no hablar de los componentes de los ribosomas. Por consiguiente, ¡el ADN contiene versiones codificadas de sus propios decodificadores! Al descifrar sus propios genes, los agentes descifradores manufacturan copias de sí mismos. Como vemos, el bucle de realimentación es grandioso. Y el código genético está *enclavado*, porque los decodificadores no pueden sino producir más copias de sí mismos. No sólo eso, sino que fabrican enzimas que reproducen exactamente el ADN, asegurando así que las nuevas células tengan un mismo ADN que las antiguas, y que se sirvan del mismo código.



Los ribosomas van "leyendo" la secuencia de tripletes de nucleótidos del ARNm e "hilando" filamentos de proteína

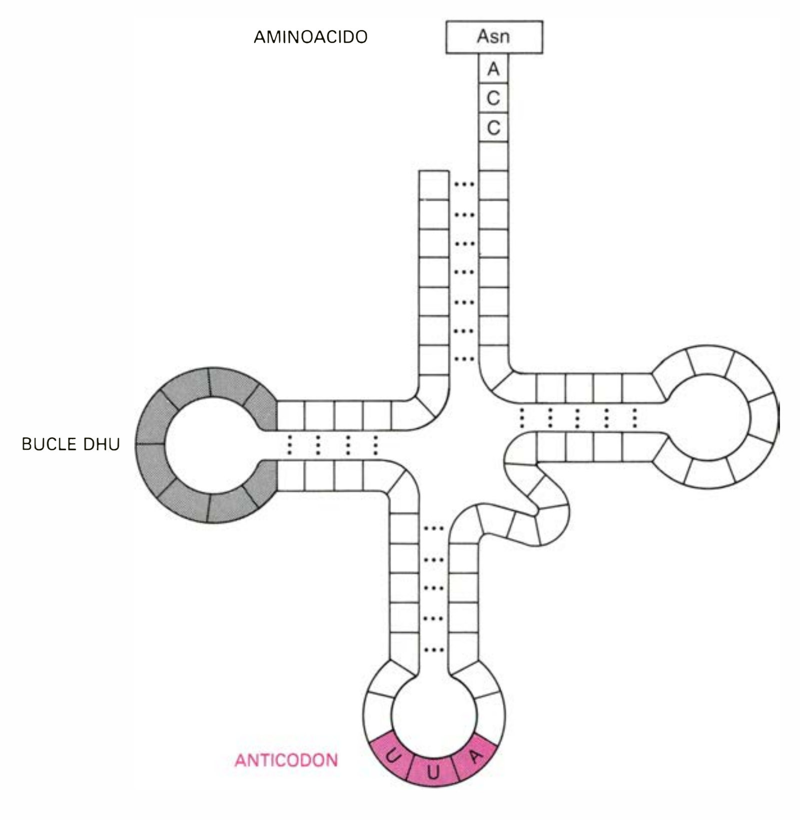
Una cosa es un código enclavado, y otra, un código inevitable. Por ejemplo, el idioma francés está enclavado en Francia, no sólo porque los franceses adultos lo hablan, sino porque hacen que sus hijos lo aprendan y lo empleen. Además, para estabilizar el lenguaje se publican diccionarios y gramáticas. Pero el francés no es el único lenguaje posible del mundo, ni el vocablo francés que expresa una cosa dada no está intrínsecamente ligado a la cosa por alguna regla de origen divino. El idioma francés es un código convencional, arbitrario, como lo es cualquier otro idioma humano.

¿Pudiera ocurrir que el código genético fuese también modificable, pese a estar enclavado por el bucle de realimentación? ¿Habrá algún modo concebible de lograr modificarlo? Si nosotros pudiéramos trastocar la tabla de la página 114, ¿cuál sería a nivel celular el resultado del código genético creado por nosotros? ¿Qué clase de pases mágicos tendríamos que dar a los filamentos de ADN si quisiéramos que nuestro personal código fuese el utilizado?

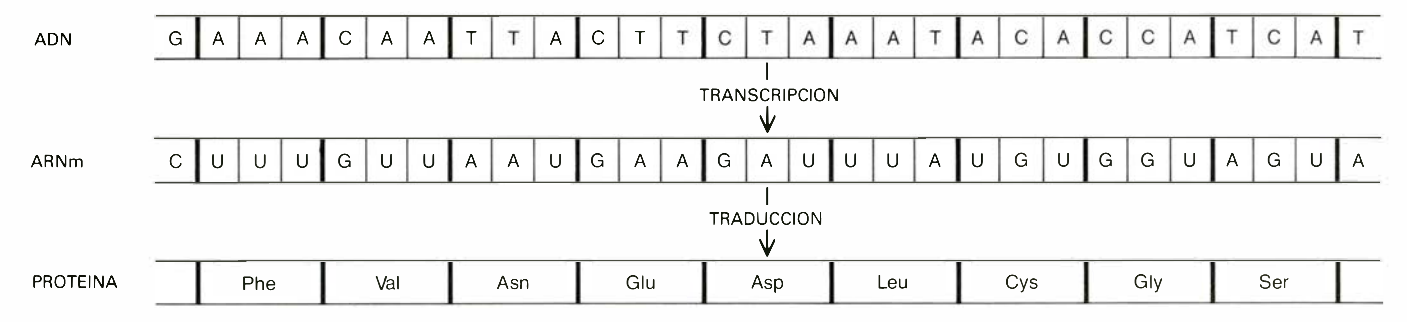
He aquí el hipotético guión de una novela de fantaciencia. Se toma una célula ordinaria, en funcionamiento normal, y por algún procedimiento a imaginar la desproveemos de todo su ARNm y su ARNt. Estas moléculas se arrojan al cubo de desperdicios. Después retiraremos de la célula todo su ADN (que conservaremos), dejando tras nosotros un minúsculo montón de desechos y pecios a la deriva, entre ellos, algunos enzimas y ribosomas. Estos enzimas y ribosomas no tienen ahora ocupación, pues nada queda en la célula que transcribir o traducir, pero si tienen un poco de paciencia enseguida los atenderemos. Tomamos el ADN que extrajimos y lo trucamos, reinyectándolo después en la desprevenida célula. ¿Será posible que esta célula y su progenie se valgan desde ahora y en lo sucesivo de nuestro nuevo código genético? ¿Qué clases de modificaciones hubiéramos tenido que forjar en aquella pieza de ADN para que la célula siguiera funcionando igual que antes, si bien con el nuevo código?

Pero, ¿qué significa "funcionar igual que antes" en este extraño contexto? Significa que a un observador exterior la célula debería ofrecerle el mismo aspecto que antes. ¿Qué determina el funcionamiento general de la célula, desde el punto de vista global? La respuesta es: el comportamiento de sus proteínas. Son las proteínas quienes dan a las células su carácter propio, su personalidad. Sabiendo esto, ¿cómo podremos garantizar que la personalidad que al exterior ofrece nuestra célula permanezca invariable, pese a haber subvertido y transtornado su lenguaje interno?

En el momento en que insertemos en



Desplegada, la molécula de ácido ribonucleico de transferencia (ARNt)



El código genético del ARNm se transcribe del ADN y luego se traduce en proteína

la célula el ADN modificado muchas polimerasas empezarán a operar sobre él. Las polimerasas lo transcribirán a hebras de ARN, concretamente a breves retazos de ARNt y largos trenes de ARNm. Los recortes de ARNt se doblarán, adoptando su peculiar forma de *L*. Entonces, diversas sintetasas, al encontrarse con los ARNt recién producidos, los cargarán con aminoácidos. Los ribosomas, obedientemente, irán valiéndose de los ARNt recién cargados para ir traduciendo los ARNm. Por consiguiente, si hemos de producir las *mismas proteínas* que antes, tendremos que cerciorarnos de dos cosas: (1) que los nuevos ARNm han incorporado a sí el nuevo código genético, y (2), los nuevos genes de las proteínas han de estar escritos en el nuevo código.

El objetivo 1 equivale a garantizar que cada ARNt posee el anticodón correcto de acuerdo con el nuevo código. Para lograrlo nos será suficiente cambiar tres nucleótidos en cada gen de ARNt contenido en el ADN. Por consiguiente, el primer grupo de cambios a realizar será detectar todos los genes de ARNt y en cada gen mutar el codón de ADN, que al ser transcrito se transformará en el anticodón del ARNt.

Para lograr el objetivo 2 es suficiente redactar de nuevo toda la "literatura", es decir, todos los genes de las proteínas, en el nuevo idioma.

¿Y de veras funcionará todo tal como esperábamos? Por ejemplo, ¿ejecutarán las sintetasas correctamente sus tareas? Veamos. Cada ARNt se plegará exactamente igual que antes. (Recordemos que el anticodón no afecta al repliegue del resto del ARNt; en particular, no afecta en nada al bucle DHU.) Ahora llega la sintetasa y se encuentra un bucle DHU de aspecto familiar. Así que le adhiere el mismo aminoácido que le hubiera adosado antes. El enzima ha sido "timado" tal como esperábamos, y se ha convertido en cómplice de nuestra traición, porque según el *antiguo* código genético este ARNt porta un anticodón *erróneo* para tal aminoácido, mientras que según el *nuevo*, porta el anticodón *correcto*.

Si se repasa el esquema de un extremo a otro se verá que funciona efectivamente. Podemos insertar una pieza de ADN "supernatural" en una célula que disponga de la maquinaria de decodificación de primera etapa (el sistema de ARN polimerasas) y la célula procederá a generar una nueva maquinaria de decodificación de segundo nivel (ribosomas y ARNt), y subsiguientemente, a producir todas las proteínas que estaban codificadas de forma "supernatural" en el ADN. Estas proteínas imbuirán colectivamente a la célula el mismo carácter externo que antes mostraba, cuando el código genético empleado era el ordinario.

Así pues, hemos tenido éxito en la tarea de mostrar que el código genético es tan arbitrario como la codificación numérica de Gödel. Y de hecho, resulta que en el interior de las mitocondrias de muchos organismos ¡ya se ha producido la modificación del código! (Las mitocondrias son orgánulos semiautónomos situados en el interior de las células, cuya finalidad es realizar la respiración y producir vectores de energía, ATP, para la célula huésped. Las mitocondrias disponen de sus propios ribosomas, ADN, ARNt, etcétera.) El código genético de las mitocondrias es pariente cercano del código convencional, pues tan sólo se diferencia en cuatro codones. Por así decirlo, más que un lenguaje completamente nuevo es un *dialecto* del idioma nucleotídico, algo así como el joual, que se habla en ciertas partes de Quebec, es dialecto del francés. En tales zonas el joual está igual de enclavado que pueda estarlo el argot parisiense en París. Las mitocondrias disponen de sus propios ARNt, que en el cuerpo principal de la célula no serían "comprendidos", pero que dentro de ellas se defienden perfectamente bien, lo que confirma nuestro punto de vista inicial.

Esta excursión por el funcionamiento de la célula tan sólo nos ha dado la más superficial visión de las complejidades y sutilezas de los mecanismos que, conjugados, resultan en vida. ¿Por qué tantas etapas, tantos intermediarios? ¿Por qué es todo tan indirecto?

Recuerdo la visita que hice a la planta de impresión de *Scientific American* en Chicago. Quedé atónito por el grado de oblicuidad y tortuosidad –niveles y niveles de procesos intermedios– de la compleja maquinaria. No hacía yo más que preguntar acerca de los volantes, engranajes y sistemas de poleas, ¿Y *esto* para qué es? Resultaba siempre que el dispositivo correspondiente daba a la planta flexibilidad mayor en algún aspecto que pudiera no estar inicialmente previsto. En el desarrollo de cualquier máquina es casi seguro que el primer modelo fue muy burdo. En su diseño solamente se tuvieron en cuenta las aplicaciones y circunstancias más inmediatas. Los refinamientos que se van introduciendo con los años se traducen en grados de complejidad tal que el sistema evolucionado puede resultarle difícil de comprender a quien no esté familiarizado con él; esto vale tanto para automóviles, aviones, radios, televisores, ordenadores como pianos.

Desde esta luz no puede sorprendernos que la célula tenga tantos y tan delicadamente compensados mecanismos, algunos de los cuales tienen por función corregir los errores cometidos por otros. A veces los biólogos y bioquímicos escriben sobre estos temas de forma que parecen mostrar la más maravillosa comprensión de los árboles sin en cambio ver el bosque. La forma en que yo veo la maquinaria de la célula viva, el tipo de experimento mental contrafáctico que se me viene a las mientes –en breve, el enfoque presentado aquí– es sin duda distinta de la imagen que se hace un especialista. Lo que yo saco en limpio de un tratado tan lúcido y concienzudo como la *Bioquímica* de Lehninger es una silueta: la sombra proyectada por los procesos celulares en el espacio de procesos de información. Confío en no andar muy descarriado, porque el perfil de la sombra es muy hermoso.

Taller y laboratorio

Motores magnéticos de Monus que recuerdan el movimiento perpetuo

Jearl Walker

Paul Monus, de la Universidad estatal de Cleveland, construye unas deliciosas máquinas formadas por un imán que se mueve en presencia de otros imanes, en una acción que, a veces, parece no tener fin. Tales motores se distinguen por poseer un pequeño imán cilíndrico que rueda sobre una pista formada por otros imanes protegidos con una lámina de plexiglás. El impulso esencial proviene de la interacción entre los campos magnéticos del imán móvil y los imanes fijos. Pero el movimiento prosigue gracias, no sólo a la cantidad de movimiento que adquiere el imán móvil, sino también, en ocasiones, a un electroimán estratégicamente situado junto a la pista.

Nuestros motores pueden considerarse una derivación de las investigaciones de Monus acerca del rendimiento de los motores de corriente continua magnéticamente asistidos. Se pretende, en unos, que el imán móvil se traslade desde un punto de partida hasta un punto de llegada definido; en otros, que el movimiento iniciado por el experimentador se prolongue mucho tiempo. Mi artificio preferido consiste en un imán cilíndrico que rueda indefinidamente sobre un dispositivo compuesto por varios imanes permanentes y un electroimán.

De entre los motores de Monus, el más sencillo posee una pista recta formada por 155 imanes cerámicos planos, cada uno de 25 milímetros de largo, 19 milímetros de ancho y 5 milímetros de grueso. Estos imanes se disponen en bloques de un lado a otro de la pista, que consta de 31 bloques emparedados horizontalmente entre dos bandas de hierro dulce, cada una de 25 milímetros de ancho, unos 6 milímetros de grueso y 790 milímetros de largo. Bloque y bandas se mantienen en posición mediante tornillos de latón horizontales. (El latón presenta la ventaja de no deformar los campos magnéticos.) Los imanes cerámicos guardan todos la misma orientación, de modo que una de las bandas resulta ser un polo magnético sur y la otra un polo magnético norte.

Los imanes cerámicos y el hierro dulce pertenecen a la clase de materiales llamados ferromagnéticos. Los otros tipos de materiales presentan propiedades magnéticas únicamente cuando se introducen en un campo magnético preexistente. Los materiales ferromagnéticos son magnéticos por sí mismos, en virtud de la disposición particular que adoptan algunos de los electrones de sus átomos. Todos los electrones están rodeados de un campo magnético propio, cual si formaran minúsculos circuitos eléctricos. Más aún, cuando se aborda el estudio de los materiales magnéticos, suelen imaginarse los electrones como si de tales minúsculos circuitos se tratara en realidad. Para representar de una manera más completa el campo magnético con que contribuye cada electrón, a éste se le asocia un vector llamado momento magnético. Todos los electrones tienen el mismo momento magnético.

En los materiales no ferromagnéticos la orientación de tales vectores es aleatoria. Entonces, dado que todos los materiales poseen un número enorme de electrones, por cada vector habrá otro apuntando en sentido contrario. Emparejados así los electrones de cada uno de los átomos, resultan neutralizados todos los vectores, y será nulo el campo magnético que presente el material. Aquí precisamente reside la causa de que el cuerpo humano no sea magnético, pese a su abundancia de electrones.

En un material ferromagnético la situación es diferente a causa del alineamiento recíproco de gran número de electrones. En este caso, cada átomo posee dos electrones carentes de parejas con la que neutralizar sus momentos magnéticos, por lo que dichos electrones ofrecerán un campo magnético neto no nulo. Las zonas donde los momentos magnéticos de los átomos se colocan paralelamente se llaman dominios, de modo tal que cada dominio posee su propio momento magnético neto.

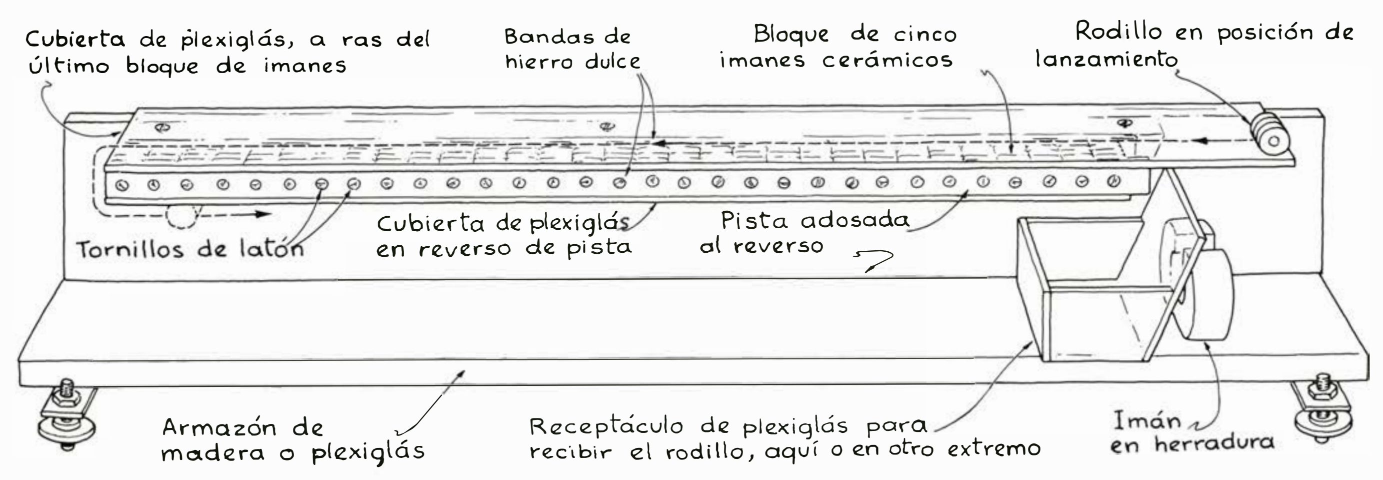
Si los imanes permanentes presentan un campo magnético (aunque no estén en presencia de un agente que lo cree), es porque una gran cantidad de los momentos magnéticos de los dominios se orientan paralelamente. Si los momentos magnéticos de los dominios están completamente paralelos se dice que el imán se halla saturado. Si no están tan perfectamente alineados, el campo magnético del imán será algo más débil. Monus construye su pista con imanes permanentes cuyos dominios poseen unos momentos magnéticos orientados de forma que generan un campo magnético relativamente intenso.

Los dominios del hierro dulce de las bandas se orientan con menor paralelismo, razón por la cual se dice que el hierro dulce es magnéticamente blando. Pero cuando Monus une el hierro dulce a los bloques de imanes permanentes cerámicos, los campos magnéticos de éstos promueven paralelismos entre los momentos magnéticos de los dominios del hierro. Entonces, las bandas de hierro se suman al campo magnético que rodea la pista y, además, facilitan que la transición del campo magnético de un bloque al siguiente sea suave.

Encima de la pista de imanes, Monus asegura una lámina plana de plexiglás, y corta uno de sus extremos a ras del final de la pista, mientras que el otro la rebasa y sirve de tramo de lanzamiento del imán cilíndrico. Esta lámina tiene unos 75 milímetros de ancho, 3 milímetros de grueso y 940 milímetros de largo. Así pues, el voladizo correspondiente al tramo de lanzamiento tiene una longitud de unos 150 milímetros.

En la superficie inferior, o reverso, de la pista Monus monta una lámina de plexiglás similar, cuyos dos extremos corta a ras de la pista. Toda la estructura se apoya, a una altura de unos 50 milímetros, sobre una base de plexiglás o madera. En vez de estos materiales no magnéticos pueden emplearse, desde luego, otros. Ajusta el soporte hasta que la pista queda horizontal. (Monus construye también motores con la pista inclinada respecto a la horizontal; de ellos me ocuparé después.)

El imán cilíndrico que es propulsado por el campo magnético de la pista está constituido por tres imanes cerámicos anulares unidos entre sí, cada uno de los cuales tiene un diámetro de 25 milímetros y un espesor de unos 6 milímetros. Los anillos se unen mediante una



Dispositivo de Paul Monus para hacer que un rodillo se desplace por una pista horizontal

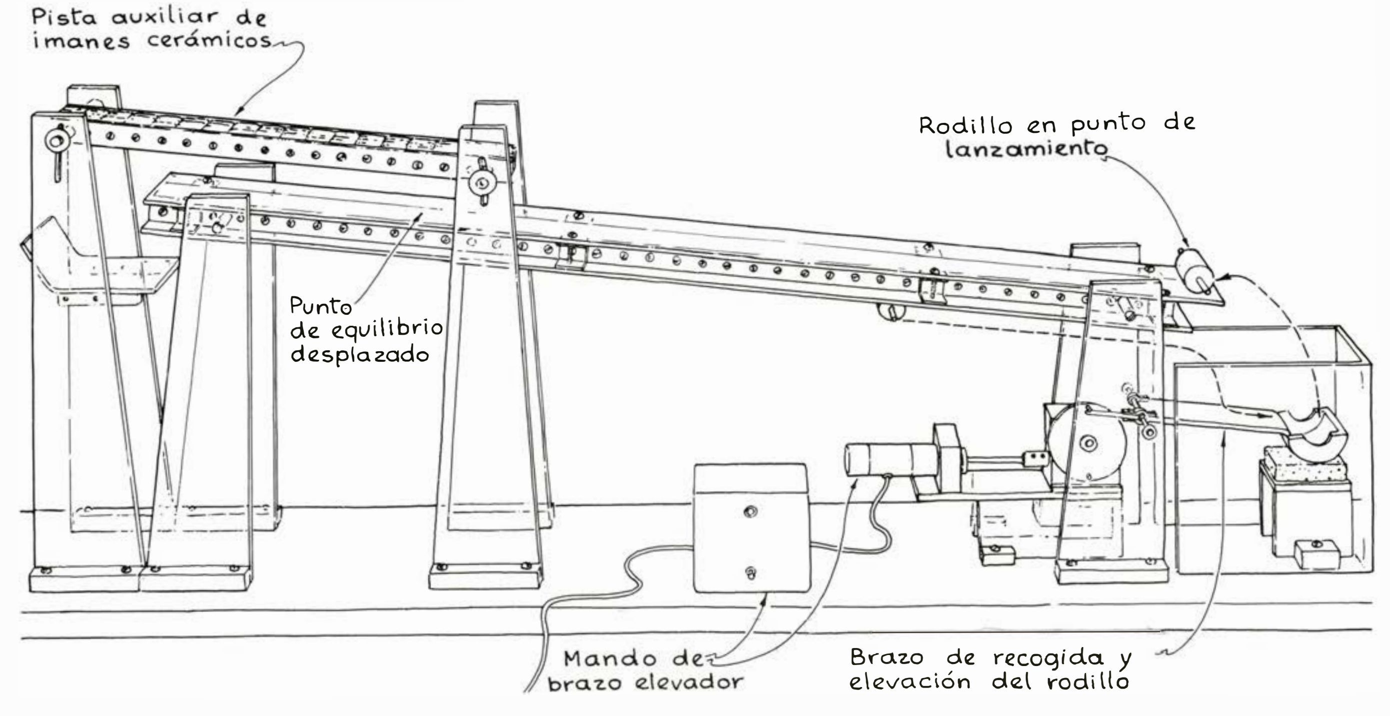
varilla de madera o plástico que se introduce a presión por el orificio central; se colocan de modo que las caras polo norte se enfrenten a las caras polo sur.

El rodillo se sitúa sobre el tramo de lanzamiento de la cubierta de plexiglás con su campo magnético orientado al contrario que el campo magnético de la pista; o sea, con el polo sur en el mismo lado que el polo norte de la pista. Cuando se lanza el rodillo, el campo magnético de la pista impide que se ponga a girar en torno a un eje vertical y, además, lo atrae hacia sí. La fuerza magnética sobre el rodillo se combina con la cantidad de movimiento del mismo y hacen que ruede a lo largo de la pista manteniéndose en contacto con el plexiglás.

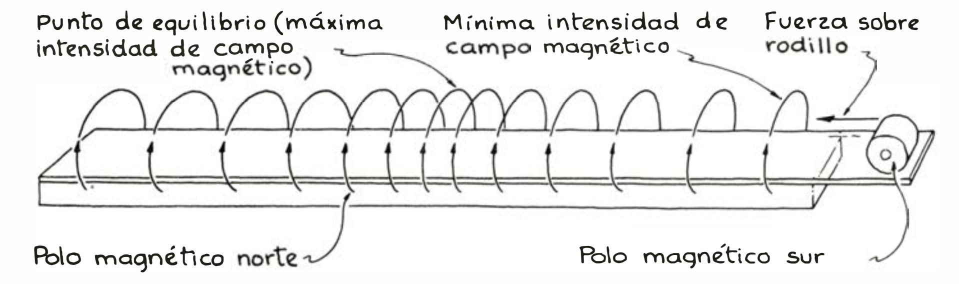
La propulsión horizontal es resultado de la interacción del campo magnético del rodillo con el campo magnético variable que atraviesa. Los campos magnéticos suelen representarse mediante las llamadas líneas de campo, de suerte que un campo magnético más intenso se representa mediante un conjunto de líneas de campo más densamente distribuidas. El rodillo inicia su viaje en una zona donde las líneas de campo están relativamente espaciadas; se ve atraído, luego, hacia zonas cuyas densidades de líneas de campo son cada vez mayores. Este gradiente de líneas de campo (que representa la intensidad del campo magnético de la pista) origina la fuerza necesaria para acelerar el rodillo.

Cuando el rodillo pasa por el primer bloque de imanes cerámicos, continúa acelerándose, ya que lo impulsa el campo magnético de la pista. En el punto medio de ésta, la fuerza propulsora disminuye para desaparecer seguidamente. Debido a la cantidad de movimiento que lo anima al llegar al punto de equilibrio, el rodillo no se detiene allí, sino que lo sobrepasa y prosigue hacia el final de la pista. Pero, entonces, la fuerza magnética que actúa sobre el rodillo se opone al movimiento y le va restando velocidad, gradualmente.

Supongamos que el plexiglás se prolongue más allá del final de la pista. En tal caso, el rodillo, traspasado el último bloque de imanes, seguirá moviéndose antes de que la fuerza magnética le obligue a pararse. La distancia que recorra más allá del último bloque dependerá de la energía que haya perdido durante el trayecto. Si tal pérdida es insignificante, la distancia recorrida pasado el último bloque será igual a la que



Doble pista para hacer que un rodillo ruede pendiente arriba



Campo magnético a lo largo de la pista

lo separaba del primer bloque en el momento del lanzamiento. Este comportamiento se debe, por supuesto, a la conservación de la energía. Cuando el rodillo penetra en el campo magnético de la pista, adquiere cierta energía potencial. Luego, a medida que dicho campo lo acelera, su energía potencial se convierte paulatinamente en energía cinética, aunque su energía total permanecerá constante.

Cuando el rodillo pasa por el punto de equilibrio, su energía cinética y su velocidad son máximas y, a partir de ese instante, el campo magnético de la pista hace que su velocidad disminuya paulatinamente y que su energía cinética vaya reconvirtiéndose en energía potencial. Esta transformación se completa cuando la distancia entre el rodillo y el último bloque se iguala a la inicial entre el rodillo y el primer bloque.

El resultado de esta combinación de fuerzas es que el rodillo recorrerá la pista alternativamente en un sentido y otro, pasando ininterrumpidamente su energía de potencial a cinética y viceversa. Este movimiento proseguiría indefinidamente si no hubiese algo que agotase, más o menos poco a poco, la energía del rodillo. Ese algo es principalmente el rozamiento entre el plexiglás y el rodillo. El rodillo también pierde energía porque, al desplazarse en el seno del campo magnético de la pista, desbarata el paralelismo de los dominios del hierro. En ambos casos, la pérdida de energía se traduce en una pequeña generación de calor, que se manifiesta tanto en las superficies del rodillo y del plexiglás (a causa del rozamiento) como en la de los imanes (a causa de los empellones que se propinan los dominios contiguos).

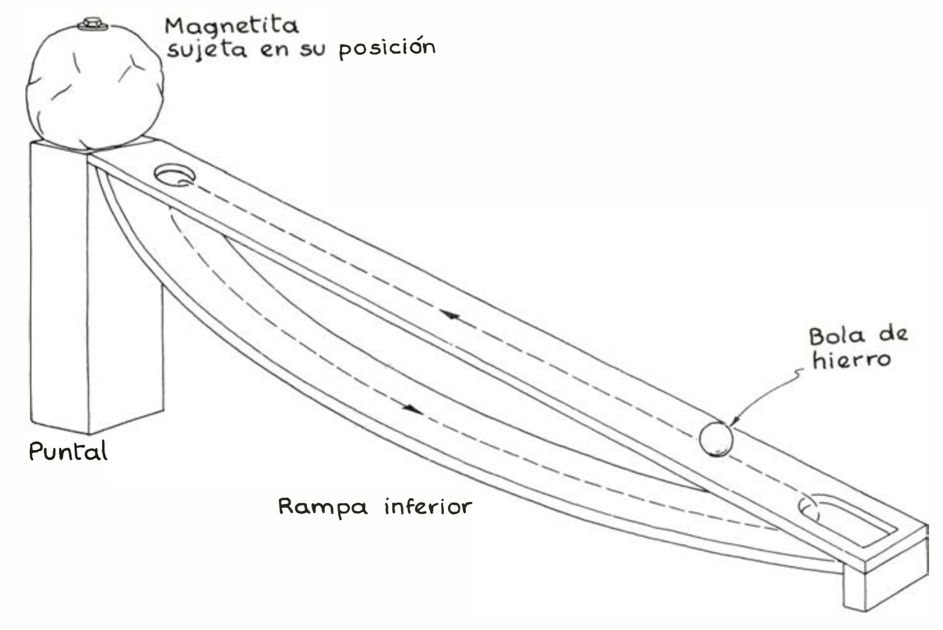
Por consiguiente, la energía total del rodillo es un poquito menor a cada recorrido por la pista; y, por ello, la distancia que recorre cada vez más allá del último bloque va disminuyendo hasta que deja de sobrepasarlo. Finalmente, se agotará la energía del movimiento y el rodillo se detendrá en el punto de equilibrio de la pista.

Monus ha ideado un procedimiento para evitar que el rodillo ejecute un movimiento simétrico de vaivén. Como ya les indiqué, el extremo final del plexiglás está enrasado con el final de la pista. Cuando el rodillo llega a ese punto, lo sobrepasa, instante en el que podrá ocurrir una de varias cosas. Si el rodillo está animado de poca velocidad, los imanes de la pista lo retendrán, obligándole a contornear el extremo de la pista, a cuyo reverso cubierto de plexiglás quedará adherido, para retroceder seguidamente hacia el tramo de lanzamiento rodando por la superficie inferior de la pista. En el tramo de lanzamiento se acaba el plexiglás y puede que el rodillo salte por el extremo inicial de la pista para dar contra la cara inferior del tramo de lanzamiento. Posiblemente, esa repentina pérdida de energía baste para detener el movimiento.

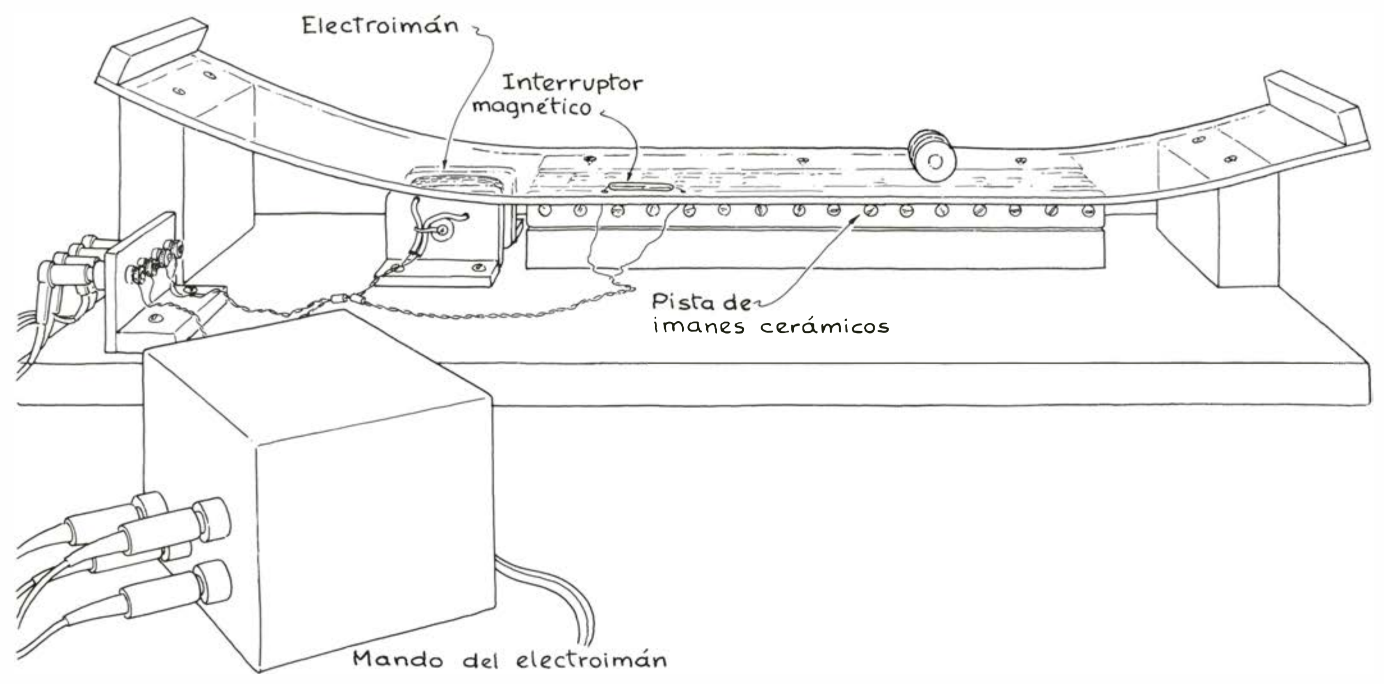
Si el rodillo está animado de una buena velocidad al caer por el final de la pista, irá a dar contra la base que soporta todo el dispositivo. Si la base no está muy separada de la pista, el campo magnético de ésta seguirá atrayéndolo y lo hará retroceder a lo largo de la base. Pero si ésta se halla excesivamente por debajo de la pista, podría ser que el rodillo no reciba una fuerza impulsora suficiente para mantenerlo en movimiento y se pare poco después de la caída.

Monus ha añadido dos detalles importantes a esta estructura básica. Primero, para proteger la base del impacto que supone la caída del rodillo, suele armar un receptáculo de plexiglás que lo recoja. Dicho receptáculo puede encontrarse en el final de la pista, en cuyo caso recogerá los rodillos rápidos que no regresarían por el reverso de la pista. Otra posibilidad es situar el receptáculo en el comienzo de la pista, bajo el tramo de lanzamiento, con lo que recogerá los rodillos lentos que regresan por el reverso de la pista. Segundo, sobre la base, e inmediatamente bajo el tramo de lanzamiento, coloca un imán permanente en herradura, en parte para provocar el desprendimiento, al final de su recorrido, de los rodillos que regresan por el reverso de la pista.

Con vistas a establecer la velocidad inicial correcta del rodillo, Monus ha experimentado con el imán adicional. También ha investigado acerca de la distancia inicial entre el rodillo y el primer bloque de imanes cerámicos. Incrementando esa distancia resulta que el rodillo desciende por la pista con demasiada celeridad y cae de ella sin retornar. Con una distancia menor, el rodillo contornea el final de la pista y vuelve al tramo de lanzamiento por el reverso. Con una distancia menor el rodillo regresará por el anverso de la pista.



Así imaginaba Johannes Taisnierus el "movimiento perpetuo" en el siglo XVI



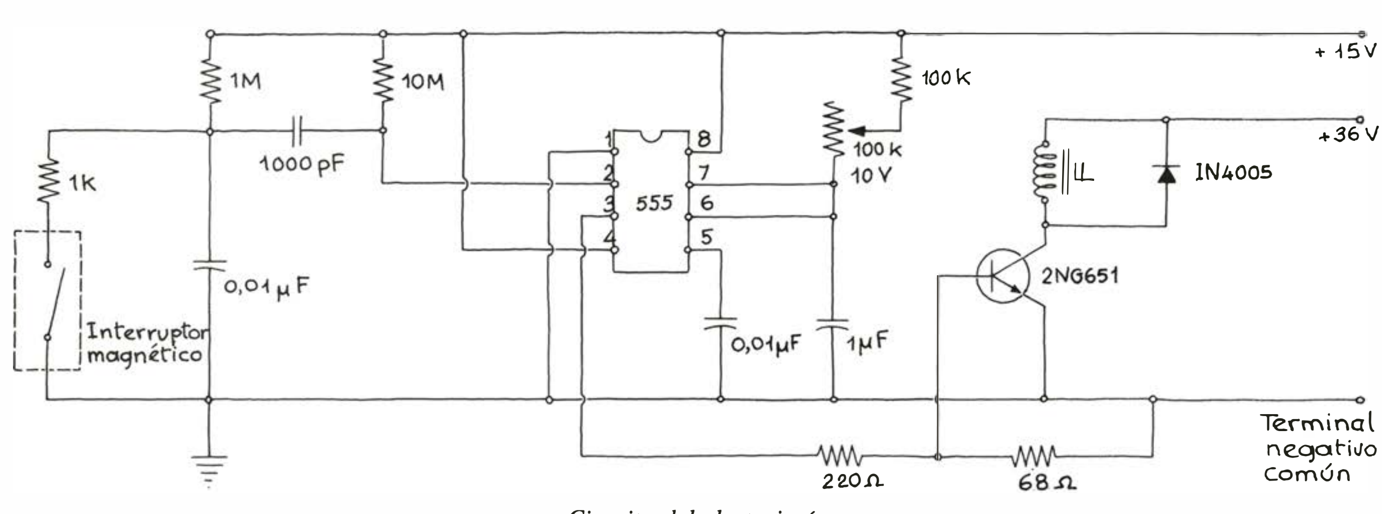
Compensación de la energía perdida por un rodillo mediante un interruptor magnético y un electroimán

No es necesario que estos motores magnéticos sencillos sean horizontales. Cuando el final de la pista se eleva, en el lanzamiento se precisarán aceleraciones cada vez mayores para conseguir que el rodillo alcance el final. Para facilitar el ascenso por pistas inclinadas, Monus ha diseñado otro tipo de motor. Por encima de los tramos finales de la pista, se monta otra pista de imanes cerámicos, construida igual que la principal y con idéntica orientación. Esta segunda pista tiene por misión desplazar el punto de equilibrio desde el punto medio de la pista hacia su final. Consecuentemente, el rodillo se acelerará a lo largo de un trecho más largo de la pista principal y recorrerá una distancia mayor antes de comenzar a perder velocidad; así podrá ya subir por una pendiente moderada.

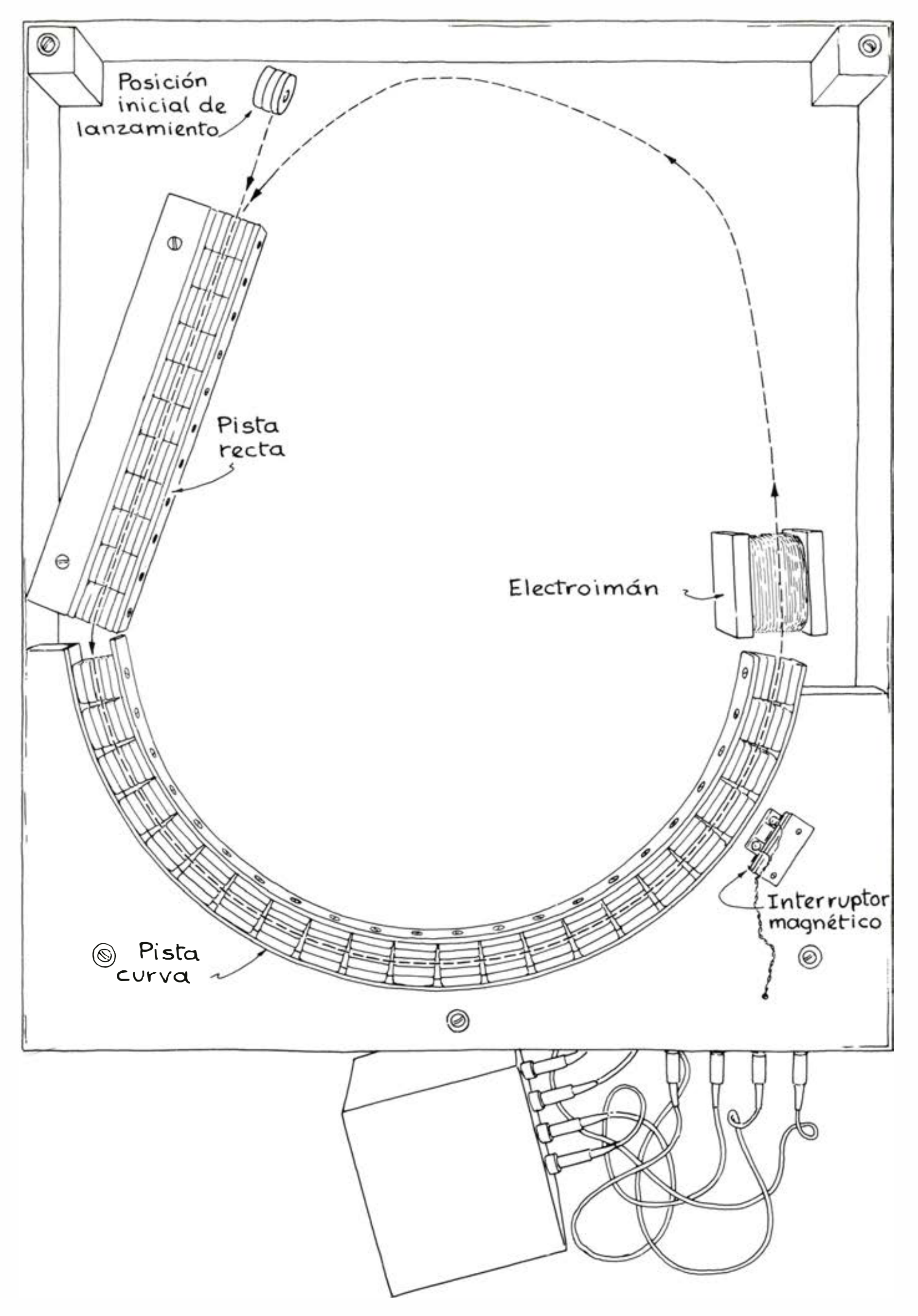
Según Monus, la posición de la pista auxiliar es crítica. Para instalarla se vale de tornillos de latón que traspasan horizontalmente las ranuras practicadas en los montantes de plexiglás que la sostienen. Entonces, ajustando la posición de los tornillos en las ranuras consigue la separación óptima entre ambas pistas y la mejor inclinación para la pista auxiliar.

Cuando todo se halle correctamente ajustado, el rodillo contorneará el borde del final de la pista principal y regresará al comienzo, más bajo, de ésta a lo largo de su reverso. En esta segunda parte del recorrido, el rodillo adquiere velocidad a medida que pierde altura. La lámina de plexiglás del reverso de la pista se extiende un poco más allá de su final y, entonces, a causa de ello y del aumento de velocidad en el descenso, el rodillo se desprende de la pista al llegar al final, donde lo recoge un mecanismo que lo devuelve a la posición de partida.

Al rodillo lo recoge una especie de cucharón de plexiglás, revestido de espuma plástica que lo protege de los impactos. Este cucharón está montado en un brazo giratorio movido por un motor eléctrico, de forma tal que, cuando el rodillo cae en su interior y ejerce una presión, el brazo gira hacia arriba y lo deposita en el tramo de lanzamiento. Se repite el recorrido completo pista arriba y de vuelta por el reverso, prosi-



Circuito del electroimán



Un rodillo que no para de moverse, gracias a la acción de un electroimán

guiendo el movimiento en tanto que el brazo accionado por el motor deposite una y otra vez el rodillo en el tramo de lanzamiento.

Este tipo de mecanismo insinúa abiertamente la idea de "movimiento perpetuo". La nuda verdad es que el movimiento sólo prosigue porque el brazo movido por el motor devuelve el rodillo a su posición de lanzamiento. Sin ese suministro de energía, no habría tamaño reciclado constante del rodillo.

En 1570, el padre Johannes Taisnierus, de la Compañía de Jesús, creyó que un dispositivo similar diseñado por él funcionaría a perpetuidad. Su idea consistía en montar un trozo de magnetita (material magnético) en el extremo de un puntal hacia el que discurría una rampa desde el suelo. Entonces colocaba una bola de hierro al pie de la rampa y, si la magnetita ejercía una fuerza suficientemente intensa, la bola sería atraída rampa arriba. Ya cerca del final de la rampa, la bola llegaba a un agujero, cayendo por él a otra rampa por lo que regresaría al punto de partida. Taisnierus creyó que el ciclo se repetiría indefinidamente. Ni que decir tiene: aunque la magnetita fuese lo bastante potente, las pérdidas por rozamiento, entre otras, pronto hubieran obligado a la bola a detenerse.

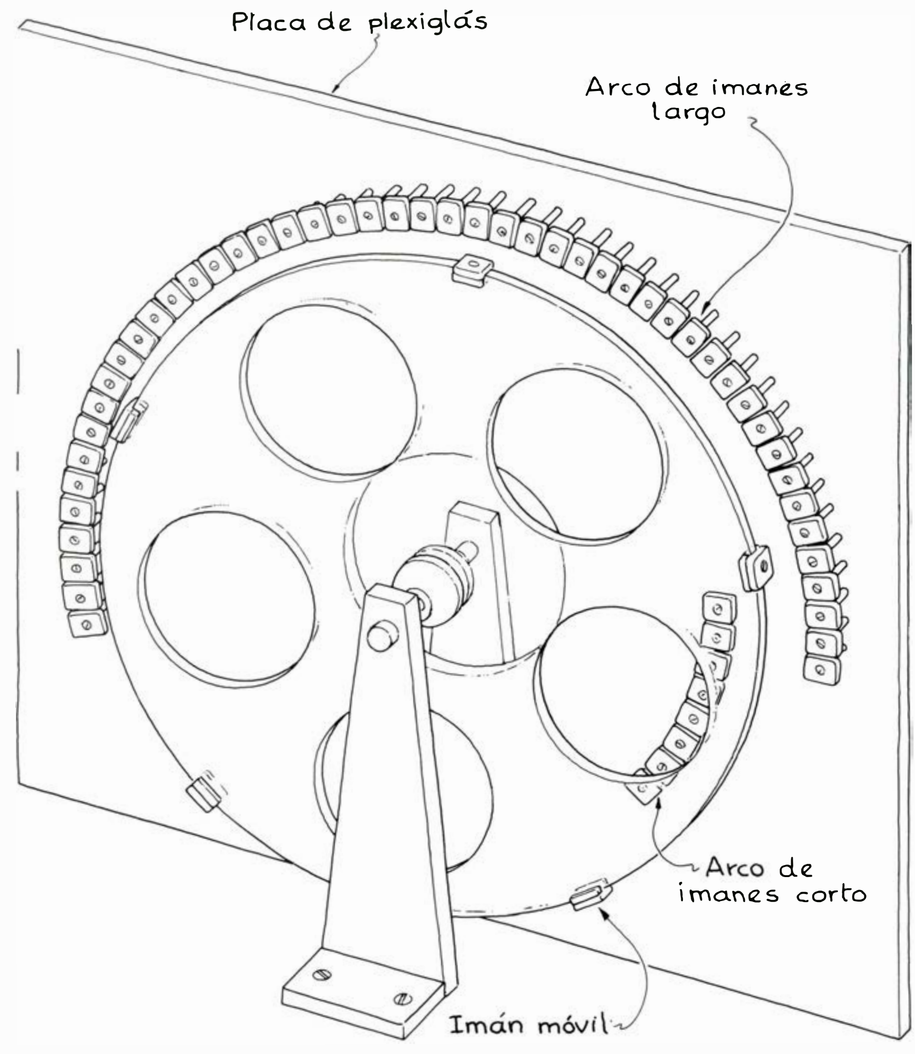
Utilizando una pista de imanes horizontal, con plexiglás encurvado hacia arriba por ambos extremos, Monus ha estudiado las pérdidas en sus motores. En un extremo de la pista colocó un electroimán que recibe corriente merced a un interruptor instalado en algún punto de la pista. Cuando el rodillo pasa por el interruptor, transcurren algunos instantes antes de que el electroimán reciba corriente, con lo que éste comienza a actuar en el momento preciso en que el rodillo se acerca al final de la pista. Entonces, aunque el campo magnético y la gravedad sigan actuando a la par frenando el rodillo, el efecto del electroimán es suficientemente intenso para mantenerlo en movimiento pista arriba.

Sin esa atracción auxiliar el rodillo se limitaría a rodar en vaivén sobre la pista hasta perder toda su energía cinética. Evidentemente, el propósito del electroimán es proporcionar la energía adicional necesaria en cada ciclo. Monus ajusta la corriente que se suministra al electroimán de modo que compense la energía que en cada ciclo pierde el rodillo y, así, éste prosigue indefinidamente en marcha. Además, midiendo la corriente que consume el electroimán puede calcular las pérdidas del sistema.

En la ilustración inferior de la página precedente se representa el circuito del interruptor y el electroimán. Son necesarias dos fuentes de alimentación (de 15 y 36 volt, respectivamente), cuyos terminales negativos se conectan a una masa común. Para el buen funcionamiento del circuito es crítico el potenciómetro. Monus ha instalado uno de diez vueltas (que se identifica como 10V en el esquema). Esta resistencia gobierna el electroimán. Si el campo del electroimán es débil en exceso, el movimiento del rodillo se extinguirá enseguida; si demasiado intenso, la atracción sobre el rodillo será tan fuerte que irá a dar contra el tope final de la pista.

El más divertido de los motores de Monus es uno cuyo rodillo viaja sobre una pista horizontal de imanes permanentes dispuestos aproximadamente en herradura. La pista consta de tres tramos: un trecho recto y corto, donde los imanes están montados como en los motores lineales que les he descrito, otro semicircular y un tercero que es un electroimán activado por un interruptor magnético que hay en el trecho semicircular. Todos estos imanes están situados bajo una lámina de plexiglás.

El rodillo se lanza desde unos siete u ocho centímetros del extremo inicial



Dispositivo rotatorio de imanes

del primer tramo y al igual que en los motores lineales, se acelera al entrar en la pista, pasa por el punto de equilibrio y prosigue hasta dejar atrás el último bloque del tramo recto. Comienza luego a atraerlo el tramo curvo, con lo que se acelera hacia el punto de equilibrio de éste, pasa por él y sale por el otro extremo del tramo.

Antes de que el rodillo tenga ocasión de ser atraído hacia atrás sobre la pista curva, comienza a rodar por encima del electroimán que ha sido activado por un interruptor magnético existente en aquélla. El pulso de corriente que llega al electroimán crea un campo magnético que atrae al rodillo y que, además, dota a éste de energía de refresco que compensa la perdida en el trayecto.

El rodillo pasa por el electroimán, que pierde su campo magnético en cuanto se desvanece el pulso de corriente, y continúa su camino por la lámina de plexiglás. Entonces, es atraído hacia el primer tramo de la pista, donde comenzó el movimiento y donde vuelve a ser acelerado. Así se repite el ciclo completo. Personalmente, me he visto sumido en la contemplación del chisme durante largos ratos, pues ejerce efectos hipnóticos: al rodillo lo acelera una fuerza invisible, se lanza sobre una pista curva, sale de ella y, luego, como sufriendo un espasmo, lo recaptura la fuerza invisible.

De todas las creaciones de Monus, la más engañosa es una rueda de plexiglás que se mantiene en rotación indefinidamente. En su borde se encuentran cinco bloques compuestos de dos imanes cerámicos cada uno, regularmente espaciados sobre el perímetro. La rueda gira sobre un eje horizontal apoyado en dos montantes de plexiglás. Paralelamente al plano de la rueda, junto a ella, hay una lámina de plástico, de mayor tamaño e inmóvil, que contiene una hilera de imanes dispuestos en arco circular a una distancia del centro un poco mayor que los imanes de la rueda. A una distancia menor hay otro arco circular de imanes más pequeño.

Cuando se hace girar la rueda, alguno de los imanes de la parte inferior se verá atraído por la hilera larga de imanes fijos, con lo que se elevará hacia ellos, para desplazarse luego paralelamente a los mismos, dando más giro a la rueda. La fuerza magnética actuante sobre nuestro primer imán disminuirá cuando haya recorrido parte de la hilera, pero entonces ésta habrá comenzado ya a atraer otro. La rueda recibe otro impulso, cuando los imanes se acercan al final de la hilera larga y al comienzo de la hilera corta. O sea, las dos hileras de imanes impulsan a cada imán móvil igual que en un motor lineal. Y cada uno de los imanes móviles pasa por el punto de equilibrio de las dos hileras y sigue su camino.

Aunque la rueda continúa girando indefinidamente sin otra ayuda visible que los imanes, su movimiento perpetuo es ilusorio: en la base de madera de la máquina se esconde un electroimán. Como en algunos de los otros motores, un interruptor magnético envía pulsos de corriente al electroimán, que a su vez va impulsando a los imanes móviles a medida que van saliendo de entre los dos arcos de imanes fijos. De esta forma, con tales impulsos se cede energía a la rueda para compensar sus pequeñas pérdidas.

Este motor se asemeja aún más a un móvil perpetuo porque carece de cable de alimentación y toma de pared que lo delate. La fuente de alimentación la constituye un condensador que almacena energía tomándola del campo electromagnético creado por la corriente de la red doméstica. Esta energía la capta una antena, también oculta en la base, en la que se induce una corriente oscilante que, una vez rectificada, alimenta al condensador. Pasado un rato, éste dispondrá de energía bastante para generar un modesto campo magnético en el electroimán cada vez que lo active el interruptor magnético.

Monus adquirió los imanes cerámicos de Permag Magnetics Corporation, 2960 South Avenue, Toledo, Ohio 43609. La marca de los imanes es Indiana General, tipos Indox 1-F-1201 los planos y 1-F-1403 los cilíndricos. Hay muchos otros tipos y marcas que pueden sustituir a éstos, aunque es necesario experimentar con el tamaño de los motores. Los interruptores magnéticos proceden de Radio Shack: interruptor minilaminar 275-1610; pueden servir otros. Quien desee información y dibujos detallados de los motores de Monus puede escribirle a Box 421, Willoughby, Ohio 44094. El librito cuesta 9,90 dólares más 1,50 dólares por envío y manipulación. Monus puede también enviar piezas y conjuntos para montar.

Libros

Lógica, extensión del egoísmo, percepción sensorial y la evolución natural de Darwin

Demetrio Díaz, Ramón Margalef, Juan J. Acero y Luis Alonso

¿CÓMO SE LLAMA ESTE LIBRO? EL ENIGMA DE DRACULA Y OTROS PASATIEMPOS LOGICOS, por Raymond Smullyan. Ediciones Cátedra; Madrid, 1981; Colección Teorema, 292 páginas. Para quienes identifican el rigor científico con la seriedad del mulo este libro resultará tan desconcertante como su título, si es que llega a merecer su atención; pero a los que piensan que la importancia simultánea del espíritu científico y el sentido del humor en la cultura anglosajona es más que pura coincidencia ha de parecerles obra interesante y adición positiva en la bibliografía de la lógica, y a quienes gustan sencillamente de los pasatiempos intelectuales entreverados de chistes y anécdotas les ofrece un festival de buenos ratos y agradables sorpresas.

Su autor, Raymond M. Smullyan, amigo, no por azar, sino por clara afinidad, del antiguo y conocido colaborador de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA Martin Gardner, es uno de esos tipos singulares, de excepcional riqueza humana y experiencia vital, nada infrecuentes sin embargo en los "campi" de las universidades norteamericanas y británicas. Licenciado en ciencias por la Universidad de Chicago al tiempo que actuaba como mago profesional, se doctoró en la de Princeton y ha llegado a ser un prestigioso profesor de lógica matemática en Darmouth, Princeton, y el Lehman College de Nueva York, a cuyo claustro pertenecía cuando publicó este libro en 1978. Entre sus obras anteriores cabe destacar su *First Order Logic* y, sobre todo, *Theory of formal systems* editada en 1961 por la Universidad de Princeton, que le califican como destacado especialista en la materia, así reconocido por Quine, sobre todo en lo que se refiere a los límites de las teorías completas y el problema de la decidibilidad. Ha colaborado en obras colectivas de matemáticas y artículos suyos han aparecido en SCIENTIFIC AMERICAN y en otras revistas. Es, además, conocedor del budismo Zen, al que también ha prestado atención en sus publicaciones.

Toda la rica personalidad y la compleja biografía de Smullyan se decantan en este libro de madurez, confiriéndole el atractivo de una original y armoniosa síntesis de ingenio y fino humor en la forma con un sólido transfondo de conocimientos científicos, sobre todo de lógica, en su contenido que dan como resultado un excelente ejemplo del clásico ideal de instruir deleitando o, tal vez aun mejor: deleitar instruyendo. Sólo un mago y además autor de un tratado sobre la teoría de los sistemas formales podía ofrecernos un libro así. Su inicial dedicación a la magia tiene positivo reflejo en la agilidad, amenidad y sorprendentes juegos de ingenio con que nos presenta este cuarto de millar de problemas mentales y entretenimientos lógicos entreverados y hábilmente entrelazados con algún que otro chiste ingenioso y unas cuantas significativas anécdotas. Así, el relato de una tentativa personal de colocarse como vendedor profesional para subvenir a sus necesidades económicas durante sus años de estudios universitarios le da pie para plantear, en el primer capítulo, la cuestión de la diferencia entre la verdad o falsedad objetiva de una proposición y la intención veraz o mentirosa del que la profiere, ilustrándola además con una serie de casos y anécdotas a cual más sugerente e incluso paradójica, como la siguiente: "Los médicos de un manicomio estaban viendo si podían dejar salir a un determinado paciente esquizofrénico y decidieron hacerle un test con el detector de mentiras. Una de las preguntas que le hicieron fue si era Napoleón. Contestó que no, pero la máquina demostró que estaba mintiendo". Este relato, que dice haber leído en un manual de psicología anormal, le proporciona seguramente la idea clave para construir la interesante serie de acertijos lógicos del capítulo 12 ("¿Vive aún Drácula?"), hilvanados sobre el imaginativo supuesto de que el autor, para hallar respuesta definitiva a esa pregunta, hace un viaje a Transilvania, donde se encuentra con que la mitad de sus habitantes son vampiros y la otra mitad humanos, pero externamente indistinguibles; los humanos no mienten nunca, los vampiros mienten siempre y lo que complica aún más la situación es que, además, la mitad de los transilvanos están locos y creen que todas las proposiciones objetivamente verdaderas son falsas y las falsas verdaderas, mientras que el resto están cuerdos y saben perfectamente qué proposiciones son verdaderas y cuáles falsas. Resultan así cuatro tipos diferentes: (1) los humanos cuerdos, (2) los vampiros cuerdos, (3) los humanos locos y (4) los vampiros locos. Como es de suponer, esta situación da lugar a que al autor se le planteen o nos plantee los más curiosos e interesantes problemas, tales como éstos:

"Me encontré una vez a un habitante y le pregunté: '¿Eres un vampiro loco?'. El respondió: 'Sí' o 'No', y supe de qué tipo era. ¿De qué tipo era?"

"Me encontré una vez con dos transilvanos, A y B. Pregunté a A: '¿Es B humano?'. A replicó: 'Eso creo'. Entonces pregunté a B: 'Crees que A es humano?'. ¿Qué respuesta dio B (suponiendo que respondió 'Sí' o 'No')?"

Otros muchos ejercicios semejantes de estimulante deporte intelectual se van encadenando en los diversos capítulos del libro en torno a los personajes de "Alicia en el País de las Maravillas", a los casos policíacos del inspector Craig, al misterio metafísico de la Isla de Baal, el bosque de los hombres lobos, los cofres de Porcia (acertijos lógicos divulgados últimamente entre nosotros por una conocida revista de pasatiempos), etc., basados todos en relaciones lógicas de contradicción, implicación o equivalencia. No pocos suponen la aplicación de reglas lógicas relativas a los valores de verdad de proposiciones condicionales, bicondicionales, disyuntivas y conjuntivas.

El libro ofrece a los profesores de filosofía de nuestro bachillerato una mina de modelos de ejemplos y ejercicios para hacer de los temas de lógica del cuestionario oficial algo bastante más divertido e inteligente que esa especie de mecanismo abstracto computerizado o arte de no pensar, bajo cuya forma repelente y antididáctica aparecen con frecuencia aquellos temas. Con todo, una de las notas del libro es que no requiere ningún conocimiento previo de lógica formal. La mayoría de los enigmas que propone pueden resolverse con la sola, aunque no siempre simple, aplicación de la lógica natural, pe-

ro en los casos en que deben tenerse en cuenta algunas reglas o principios específicos de la lógica científica, el autor los expone con ejemplar sencillez y claridad didáctica. Y conste que entre tales cuestiones especializadas aparecen a su debido tiempo problemas técnicos como el de los valores de verdad de enunciados que se refieren a sus propios valores de verdad, a partir del cual se exponen diversas variantes de la conocida paradoja del mentiroso y otras no menos clásicas, para terminar el libro nada menos que con una presentación gradual del teorema de Gödel, en la que brillan por igual los conocimientos del especialista en la materia, la claridad expositiva del profesor veterano y la ingeniosa amenidad del mago.

La edición que nos ofrece Cátedra tiene una presentación muy digna dentro del carácter económico de la colección en que se publica. Reproduce los dibujos de la edición original, mejorando incluso en la cubierta la estética de la sobrecubierta de la edición norteamericana. Lástima que la revisión de las pruebas de imprenta e incluso de la traducción se hayan descuidado un tanto, acaso por una premura de tiempo que podría explicar también el hecho, sorprendente en una obra unitaria que no llega a las trescientas páginas de texto en formato de bolsillo, de que la versión aparezca a cargo de tres traductores nada menos. Como erratas más notables, que afectan a la coherencia de algunos problemas o a la inteligibilidad de pasajes importantes, mencionaremos en concreto las siguientes: "Cellini", donde debiera decir "hijo de Cellini" en el problema n.º 135 y "formal" por "informal" en la solución del 183; "2n" en lugar de "2 elevado a n" en la pág. 271 y la omisión en todos los casos del signo que denota "complemento de..." sobre las letras simbólicas que deberían llevarlo en las páginas 274, 285 y 287. En el problema 67a encontramos un error que más parece descuido en la traducción que errata de imprenta: donde el original inglés dice "at most" la edición española da "por lo menos", en lugar de "a lo sumo", diferencia no irrelevante para la solución lógica del problema. (D. D.)

The Extended Phenotype. The Gene as the Unit of Selection, por Richard Dawkins. W. H. Freeman & Co., Oxford y San Francisco; 307 págs. 1982. Este libro es una continuación de *The selfish gene*, del mismo autor, publicado en 1976 y traducido por la editorial Labor de Barcelona con el título *El gen egoísta*. Amplía ciertas áreas y desarrolla algunos puntos de manera complementaria, y aun en dirección distinta, de la presentada allí. También responde a cierto número de críticas y utiliza bastantes páginas en anticiparse a otras, contestando a lo que algunos podrían decir, pero que todavía no han dicho. Las ideas fundamentales son las mismas. Insiste en que la unidad de selección más destacada es el gen, tomado en sentido de unidad operativa, no de entidad química propiamente dicha. Prefiere el gen porque es la unidad mínima que conserva su personalidad. Bromea sobre la posibilidad de ir al "nucleótido egoísta", quizá para señalar que, dispuestos a abandonar al organismo individual como unidad de selección, debemos prescindir de más inhibiciones. Siguiendo esta línea de pensamiento, los organismos, los grupos de organismos y hasta los ecosistemas tienen el valor de colectivos o vehículos que sostienen a los mecanismos que sacan copias de los genes. Las células se reúnen en cuadrillas y los organismos establecen las relaciones más complicadas de parasitismo y simbiosis. La producción de agallas y toda suerte de engaños, la modificación por los parásitos del comportamiento de sus hospedadores, los artificios de la comunicación que permiten a los animales utilizar músculos ajenos, en fin, todas las "maravillas de la naturaleza", encuentran una explicación sencilla. Representan un fenotipo ampliado, el ingenio de los genes para conseguir perpetuarse. Los genes manipulan, con malicia y engaño, organismos y grupos de organismos para hacerse multicopiar y pasar. La idea del fenotipo extendido como expresión de la supervivencia del gen no tiene límites; con razón dice que es una de las hipótesis en las que jamás se puede demostrar su falsedad. Esta capacidad del gen es, al fin y al cabo, lo que cuenta en la vida y cree que el concepto de *fitness* es un simple truco verbal para hablar en términos de organismos, así como que el concepto de selección no es totalmente satisfactorio cuando se pretende aplicar a individuos o grupos de organismos.

El autor inicia su discurso invitando al lector a que considere el cubo de Necker, que se puede ver de una u otra forma según como se mire. Lo mismo ocurre, sostiene, con la base genética de los seres vivos. Pero yo diría que puesto que nosotros funcionamos o nos sentimos funcionar como organismos, nos vemos más naturalmente metidos dentro del cubo. Para el autor, el organismo es un vehículo temporal de una colección de genes, la persistencia de cada uno de los cuales puede ser mayor que la del individuo e incluso que la de la especie. Por eso no admite que el individuo sea la unidad apropiada para un desarrollo riguroso del concepto de selección, a pesar de la idea que de ello pudiera tener Darwin, al fin y al cabo el padre de la criatura. Se comprende la infravaloración del invididuo, porque en el área intelectual en la que se desenvuelve la discusión del presente libro no se concibe que una característica del individuo es la de estar siempre fuera de equilibrio, con lo que se convierte en un poderoso motor de evolución. Sin embargo, el último capítulo, titulado "Redescubriendo el organismo", puede servir para tender un puente hacia puntos de vista más convencionales y, en algún momento, Dawkins se pregunta en qué medida contribuye a la supervivencia el subdividir la vida en unidades discretas que llamamos individuos. Pero posiblemente esta pregunta apenas tiene respuesta en una tradición biológica que no se preocupa por la termodinámica de los sistemas abiertos.

Dawkins arremete contra casi todo el mundo, con las notables excepciones de Hamilton y Maynard Smith. Con esto su filiación intelectual queda clara, y su empresa aparece con cierto signo negativo. Se opone con energía a toda hipótesis de selección de grupo. Probablemente, la repugnancia por este concepto y la idea de que la presencia de ciertas especies pueda influir sobre el proceso de selección que opera en otra (coevolución) le llevan también a negar importancia a la selección a nivel de individuo, a ver en la evolución de individuos, grupos y especies, la manifestación de lo que, en realidad, es la simple selección a nivel de genes.

La mayor parte del texto es un discurso polémico y no abundan los párrafos presentando o interpretando datos concretos. Apenas si se analiza más que el comportamiento de avispas del género *Sirex*, en las que interpreta la existencia de posibles alternativas en sus actividades como prueba de que no es el comportamiento lo que se selecciona, sino los genes, y que cualquier comportamiento que consiga pasarlos es bueno, en cuya conclusión no habrá de hallar muchos contradictores. Reconoce la asimetría en la relación depredador-presa (el conejo corre por su vida, la zorra sólo por su cena) y apenas desarrolla sus implicaciones en las formas de selección. Contestando a Bateson, quien escribió que un pájaro es simplemente el recurso de que se vale un nido para hacer otro nido, argumenta que tanto el nido como el pájaro no son más

que el procedimiento de que se vale cierto gen –ciertos genes– para duplicarse.

Sustituye la visión al uso por la imagen de una lucha, o competencia feroz, entre genes dotados de malicia y mala fe. La verdad es que tanto esta visión como cualquier otra más plácida se hallan más en la mente del espectador que en la naturaleza. El libro no trae ilustraciones, se requeriría un Gustavo Doré para representar una pandilla de centríolos y otros ingenieros genéticos en miniatura, crueles y egoístas, arrastrando hacia la segunda anafase a cromosomas que se resisten chillando y coceando (págs. 160-161). Contempla a los genes ingeniándoselas para perpetuarse en el tiempo, en cualquier cuerpo, creando a tal fin organismos, o formas de comportamiento o extensiones culturales de los organismos. Tanto en la lucha entre las partes de un organismo como en la preocupación por estructuras que parecen ser en beneficio de otras especies, resucita discusiones que la teoría germana había tratado –de manera más plúmbea, es cierto– hace más de medio siglo. El tema del libro me recuerda una muy mala novela de ficción científica que leí y que sirvió de argumento a una película de horror, en la que, me han contado, ciertas bacterias consiguen animar a cuerpos de difuntos *para que* las dispersen. ¿No será mejor dejarse de resurrecciones, y que los muertos entierren a sus muertos? A veces parece que el propósito del libro sea simplemente hacer pensar en las incoherencias asociadas a recientes debates sobre la selección natural.

El texto está escrito en un estilo muy británico, con desenfado, dejando entender que el autor es consciente de que exagera tanto la nota de autosuficiencia como el lenguaje figurado y antropomórfico, quizá para hacerse perdonar el uso de una argumentación que, en ciertas secciones, parece encaminada a confundir o a enfurecer. Pero se lee bien; sobre todo, si se piensa en lo que sería un libro que tratara el mismo tema de manera más formal y filosófica, a estilo, digamos, continental. Cuando el lenguaje de Dawkins interfiere con el de Lovelock (la hipótesis de Gaia o Gea, pág. 234) se disparan fuegos de artificio de alcance imprevisible. (R. M.)

SENTIDO Y PERCEPCIÓN (título original: *Sense and Sensibilia*), por John Lanshaw Austin, Madrid; Tecnos, 1981, 158 págs. Traducción de Alfonso García Suárez y de Luis Ml. Valdés Villanueva. Estudio preliminar, con el título de "Austin y la decadencia de los datos sensoriales", de Alfonso García Suárez. Con este libro se colma el último hueco de importancia en la traducción al castellano de la obra del filósofo inglés John Austin (1911-1960). Hasta el momento Genaro Carrió y Eduardo Rabossi habían traducido *How to Do Things With Words* con el título de *Palabras y acciones* (Buenos Aires, Paidós, 1971) y Alfonso García Suárez había traducido ya los *Philosophical Papers* (*Ensayos filosóficos*, Madrid, Revista de Occidente, 1974). El resto de la poco abundante producción de Austin que ha sido publicada se reduce, en lo que se me alcanza, a su ensayo "Performatif-Constatif" (editado originalmente en francés, en los *Cahiers de Royaumont*, en 1963) y al recientemente traducido "La línea y la caverna en la *República* de Platón" (en la revista *Teorema*, vol. X, 1980, págs. 109-126).

Sentido y percepción (de aquí en adelante: *SP*) es, como *Palabras y acciones*, una obra póstuma, cuyo texto ha sido reconstruido por G. Warnock a partir de las sucesivas series de notas elaboradas por Austin entre 1947 y 1959, y en las que basaba sus clases y conferencias. Pese a estos avatares del texto final, se trata de una obra sumamente madurada. *SP* versa enteramente sobre la doctrina filosófica, tan clásica, de los datos sensoriales, de acuerdo con la cual los objetos de la percepción sensorial no son cosas materiales, sino las impresiones que éstas dejan en nosotros. Por su temática, *SP* es la obra más filosófica de Austin y contiene uno de los fuertes, así reconocido por sus colegas, de su pensamiento. No exagero ni un ápice si digo, por otro lado, que *SP* es, además, una de las obras más notables de la así llamada filosofía analítica y uno de los mejores exponentes de la filosofía que se practicó en Oxford entre los treinta y los setenta.

Austin suele llamar la atención del historiador o del filósofo contemporáneo por su concepción del método filosófico. Este lugar común, que ha sido reforzado por una lectura algo superficial de su ensayo más importante, "Un alegato en pro de las excusas", en la que se subrayaban los aspectos programáticos, ha obrado en detrimento de la labor filosófica propiamente dicha de Austin. En *SP*, sin embargo, la técnica de análisis de Austin para combatir las actitudes escolásticas de los filósofos –"atribuible, primero, a una obsesión por unas cuantas palabras particulares cuyos usos son simplificados en exceso, no realmente entendidos ni cuidadosamente estudiados ni correctamente descritos; y, segundo, a una obsesión por unos cuantos (y casi siempre los mismos) 'hechos' medio estudiados" (pág. 42)– es puesta en práctica paradigmáticamente en una crítica contundente de la doctrina de los datos sensoriales. *SP* servirá, incluso mejor que *Palabras y acciones*, para deshacer equívocos en la valoración tópica de la obra de Austin.

Como pretexto de esta crítica, Austin examina la exposición que hicieron de la doctrina citada Alfred Ayer, en su obra *The Foundations of Empirical Knowledge* (*SP*, caps. II, III, V, VI, VIII, IX y X), Henry Price, en *Perception* (*SP*, caps. II, III y V) y G. Warnock, en su *Berkeley* (*SP*, cap. XI). Sin embargo, en el capítulo X, el más extenso y uno de los más significativos de todo *SP*, hallamos un examen pormenorizado de algunas de las tesis características de la epistemología y la filosofía del lenguaje –resumidas en las págs. 140 y s.– del movimiento neopositivista del Círculo de Viena, y la figura de Rudolf Carnap es mencionada explícitamente en varias ocasiones.

Además de estos objetivos de índole crítica, Austin anuncia también otros que poseen un carácter más constructivo: "... podemos esperar aprender algo positivo bajo la forma de una técnica para disolver desasosiegos filosóficos (*algunos* tipos de desasosiego filosófico, no la totalidad de la filosofía); y también sobre los significados de algunas palabras... que, además de ser filosóficamente resbaladizas, son interesantes por derecho propio" (pág. 44). Así, los capítulos IV y VII, por ejemplo, están dedicados exclusivamente a esta nada molesta labor de semántica filosófica, la cual haría uno bien en interpretar recordando que para Austin el estudio del lenguaje era una forma de conocer mejor la realidad misma. El capítulo IV, en el que discute las semejanzas y diferencias semánticas que se dan entre los verbos ingleses '*look*', '*appear*' y '*seem*', encontramos un detenido análisis de las formulaciones de los juicios de apariencia que desbroza el terreno para una posterior evaluación del argumento filosófico (conocido como argumento de la ilusión) que, apelando a ilusiones habidas en nuestras percepciones, lleva a concluir que lo que vemos, oímos, etcétera, son datos sensoriales. En el capítulo VII, por su parte, que para muchos es lo mejor de todo *SP*, Austin se ocupa del significado (de los significados, mejor) de '*real*' ('real', 'de verdad') y de sus relaciones con palabras como '*genuine*' ('genuino'), '*natural*' ('natural'), '*proper*' ('apropiado') y con otras como '*makeshift*' ('artificial'), '*fake*' ('falsificado') '*bogus*' ('fingido'), etcétera. En este análisis, Austin expone algunos de sus

hallazgos más felices: como que '*real*' ('real') cuyo uso básico no es el afirmativo, sino el negativo: es decir, que es '*irreal*' la palabra que lleva los pantalones, en afortunada expresión de Austin; o como se trata de una palabra de ajuste, "con cuyo uso otras palabras son ajustadas para satisfacer las innumerables e imprevisibles demandas que el mundo plantea al lenguaje" (pág. 100). Pero en varios otros capítulos –en el segundo, con respecto a la expresión 'percepción indirecta', con propiedades como la primera de las dos expuestas a propósito de '*real*'; en el tercero, con respecto al par '*ilusión*'/'*delusión*' ('ilusión'/'engaño'), que Austin muestra, en contra de lo dicho por Ayer, que no es exhaustivo; en el onceavo, con respecto al giro '*it seems to... as if...*' ('Parece como si...')– las intuiciones lingüísticas de Austin se afilan al máximo, siempre atento a poner su veto a tesis que no es sólo que se hallen mal formuladas, sino que en la mayor parte de los casos están enunciadas en contra de los hechos. Todas estas reflexiones tienen un valor independiente y su relevancia para la teoría lingüística debería hacerse constar explícitamente.

Junto a este tipo de material, abundan en *SP* las páginas de análisis meticuloso, tan representativas de la forma de hacer de Austin, como aquellas otras en las que, aunque no sea visible del todo, se sientan tesis. A este último respecto, hay que destacar especialmente el capítulo décimo, en el que Austin ofrece sus puntos de vista en torno a las debilidades de las *epistemologías fundamentalistas* (como la cartesiana o la neopositivista), que sostienen la posibilidad de hallar sólidas y más allá de toda duda para el conocimiento humano. Lejos de todo escepticismo, Austin se enfrenta a tesis dogmáticas (como las defendidas por Ayer y Warnock), como la de la existencia de una clase de oraciones que actúan de vehículos de la evidencia sensorial y que son en sí mismas incorregibles. La actitud de Austin a este respecto es que las pruebas que podamos aducir a favor de cualesquiera creencias o tesis no es cuestión de las palabras que se utilicen para formularlas, sino que dependen de las circunstancias en que nos hallemos.

La traducción de García Suárez y de Valdés Villanueva es de una calidad innegable. Yo objetaría, sin embargo, que den como contrapartida de '*delusión*' 'delusión', neologismo presuntamente introducido sobre la base de la existencia de los adjetivos 'delusivo' y 'delusorio'. También podría reprocharse que traduzcan siempre '*real*' por 'real', incluso en contextos en los que 'de verdad' recoge mejor la idea del texto inglés. Sin embargo, esta última decisión puede aceptarse al caer en la cuenta de que el argumento de Austin al respecto podría parecer injustificado a primera vista en algún pasaje. Por lo demás, es de elogiar que ante giros o usos claramente idiomáticos los traductores recojan el texto original dando entre paréntesis las indicaciones.

El estudio preliminar de Alfonso García Suárez, muy bien escrito, presenta la figura de Austin, su significación en la filosofía contemporánea y su concepción del método filosófico, en sus dos primeras secciones. En las siguientes, introduce la problemática de los datos sensoriales y evalúa los contenidos de *SP* a propósito de esta cuestión. (J. J. A.)

THE DEVELOPMENT OF DARWIN'S THEORY: NATURAL HISTORY, NATURAL THEOLOGY, AND NATURAL SELECTION, 1838-1859, por Dov Ospovat. Cambridge University Press, Cambridge 1981. Unico libro, y póstumo, de uno de los historiadores de la biología del siglo XIX más apreciados. Dov Ospovat (1947-1980) se había doctorado en Harvard en 1974 con una tesis sobre la embriología de Karl Ernst von Baer. Prosiguió su trabajo sobre las relaciones entre Darwin y Huxley. Estudió in extenso a Richard Owen, Louis Agassiz y Henri Milne Edwards. Iba en corto y por derecho al nudo de la cuestión: arquetipos, recapitulación, divergencia, adaptación, teleología, providencialismo, selección, plan divino... los problemas que constituían el trasfondo ideológico de una ciencia incipiente, la biología, que buscaba un puesto entre las demás empíricas.

De ahí que la lectura de este libro, no obstante su tesis novedosa, resulte lisa y fluida por la ponderación de los juicios, por la tersura de la documentación aportada, por el rigor en el enfoque y en el razonamiento. Dicen las bibliografías al uso que Darwin llegó a la idea de la selección natural como mecanismo que explicaba la diversidad y evolución de las especies tras caer en sus manos, en 1838, el *Ensayo sobre el principio de la población*, de Thomas R. Malthus. Y sin más aclaraciones se añade que la expuso en su *Origen de las especies*, de 1859. ¿Por qué tardó tanto? ¿Evolucionó el pensamiento de Darwin a este respecto? Y si cambió, ¿quién o qué influyó en él?

La mejor manera de averiguarlo era leer todos sus papeles, sus notas, correspondencia, dudas, consultas, etcétera. El grueso de ese material se guardaba en la llamada "Caja negra" de la biblioteca universitaria de Cambridge. Y allí fue Ospovat con una beca a desempolvarla. Rastreada detenidamente, asimila el historiador la teoría de la selección al ciclo vital de un individuo, que se concibe en 1838, se cría y robustece en la confrontación y adquiere la mayoría de edad veintiún años más tarde. Al lector se le revela el nicho ecológico en que tal desarrollo ocurre: instado por la demanda que de una teoría general unificadora tenía la paleontología, la embriología, la anatomía comparada y la distribución geográfica.

La idea maestra que vertebra toda la especulación biológica anterior a Darwin es la del designio divino, que empapa la filosofía natural inglesa desde los tiempos de Newton, Boyle y Ray. La naturaleza no es más que el plan de su Creador, donde todas las cosas cumplen una misión específica que El les asignó. Lo orgánico y lo inorgánico se acoplan y se explican mutuamente. Todo era perfecto y armónico. Sólo que no parecía resolver las dificultades que las disciplinas antedichas encontraban para encajar en un marco racional donde la función de un organismo resultaba de su estructura creada, inmediata o mediatamente, para vivir y procrear en un determinado entorno físico. Lo que provoca un alud de ideas e hipótesis muchas veces contrapuestas a la hora de interpretar un mismo hecho. La "circunstancia" de Darwin aparece nítida y clarificadora: De Candolle, Carpenter, Lyell, Sedgwick, Owen y Agassiz, por ceñirnos a los más influyentes.

Ese es el primer corolario que uno saca de la obra de Ospovat. Hay que situar a Darwin. No ya en la cantinela tradicional que enumeraba los evolucionistas anteriores a él: Buffon, Linneo, Erasmo Darwin, Lamarck, Chambers..., sino en la "secularización" de la naturaleza y de la ciencia que se ocupa de ella. Secularizar aquí tiene el sentido fuerte de podar cuantas interpretaciones recurran, siquiera veladamente a través de la causa final, a contextos de teología natural.

El segundo corolario se identifica con la tesis del libro. Desde 1838 hasta 1854, Darwin entendía la selección natural como un mecanismo por el que se mantiene el equilibrio de la naturaleza, como una perfecta adaptación. A partir de esa fecha se va decantando en favor de una adaptación relativa, que supone y permite el desarrollo progresivo de las especies. En ese replanteamiento interviene su atención al principio de divergencia y a la especiación, entendida ahora no tanto como una diversificación geográfica cuanto ecológica o funcional. (L. A.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

OSCILACIONES SOLARES

A SOLAR RESONANT SCATTERING SPECTROMETER. J. R. Brookes, G. R. Isaak y H. B. van der Raay en *Monthly Notices* de la Royal Astronomical Society, vol. 185; 1978.

THE NEW SOLAR PHYSICS. Dirigido por J. A. Eddy. Westview Press; Boulder, Colorado; 1978.

SOLAR STRUCTURE FROM GLOBAL STUDIES OF THE 5 MIN. OSCILLATIONS. A. Claverie, G. R. Isaak, C. P. McLeod, H. B. van der Raay y T. Roca Cortés en *Nature*, vol. 282, págs. 591-599; 1979.

NON RADIAL OSCILLATIONS OF STARS. W. Unno, Y. Osaki, H. Ando y H. Shibahashi. University of Tokyo Press. 1979.

LA BUSQUEDA DE BOSONES INTERMEDIOS

THE DETECTION OF NEUTRAL WEAK CURRENTS. David B. Cline, Alfred K. Mann y Carlo Rubbia en *Scientific American*, vol. 231, n.º 6, págs. 108-119; diciembre, 1974.

LA PRÓXIMA GENERACIÓN DE ACELERADORES DE PARTÍCULAS. Robert R. Wilson en *Investigación y Ciencia*, págs. 6-23; marzo, 1980.

ANTIPROTON-PROTON COLLIDERS AND INTERMEDIATE VECTOR BOSONS. David Cline y Carlo Rubbia en *Physics Today*, vol. 33, n.º 8, págs. 44-52; agosto, 1980.

ANILLOS DE LA CORRIENTE DEL GOLFO

DISTRIBUTION AND MOVEMENT OF GULF STREAM RINGS. David Y. Lai y Philip L. Richardson en *The Journal of Physical Oceanography*, vol. 7, n.º 5, págs. 670-683; septiembre, 1977.

PATTERNS AND PROCESSES IN THE TIME-SPACE SCALES OF PLANKTON DISTRIBUTIONS. L. R. Haury, J. A. McGowan y P. H. Wiebe en *Spatial Pattern in Plankton Communities: NATO Conference on Marine Biology*, dirigido por John H. Steele. Plenum Press, 1978.

GULF STREAM COLD-CORE RINGS: THEIR PHYSICS, CHEMISTRY, AND BIOLOGY. The Ring Group en *Science*, vol. 212, n.º 4499, págs. 1091-1100; 5 de junio de 1981.

ONCOGENES

THE MOLECULAR BIOLOGY OF RNA TUMOR VIRUSES: A PHYSICIAN'S GUIDE. J. Michael Bishop en *The New England Journal of Medicine*, vol. 303, n.º 12, págs. 675-682; 18 de septiembre de 1980.

PROTEINS PHOSPHORYLATED BY THE RSV TRANSFORMING FUNCTION. T. Hunter en *Cell*, vol. 22, n.º 3, págs. 647-648; diciembre, 1980.

ENEMIES WITHIN: THE GENESIS OF RETROVIRUS ONCOGENES. J. Michael Bishop en *Cell*, vol. 23, n.º 1, págs. 5-6; enero, 1981.

APLICACIONES DEL LASER EN LA INDUSTRIA

HIGH POWER LASER WELDING-1978. Conrad M. Banas en *Optical Engineering*, vol. 17, n.º 3, pág. 210; mayo-junio, 1978.

BASIC CHARACTERISTICS OF LARGE OUTPUT HIGH-ENERGY DENSITY HEAT SOURCES. Y. Arata en *Proceedings of the International Laser Processing Conference*, Anaheim, Calif., 16 y 17 de noviembre de 1981.

SUPERCUMULOS Y VACIOS EN LA DISTRIBUCION DE GALAXIAS

THE COSMIC TAPESTRY. Guido Chincarini y Herbert J. Rood en *Sky and Telescope*, vol. 59, n.º 5, págs. 364-371; mayo, 1980.

THE PERSEUS SUPERCLUSTER. Stephen A. Gregory, Laird A. Thompson y William G. Tifft en *The Astrophysical Journal*, vol. 243, n.º 2, 1.ª parte, págs. 411-426; 15 de enero de 1981.

LA "VISION" INFRARROJA DE LAS SERPIENTES

THERMORECEPTORS IN SNAKES. P. H. Hartline en *Electroreceptors and Other Receptors in Lower Vertebrates*, dirigido por A. Fessard. Springer-Verlag, 1974.

SPATIAL PROPERTIES OF PRIMARY INFRARED SENSORY NEURONS IN CROTALIDAE. John A. DeSalvo y Peter H. Hartline en *Brain Research*, vol. 142, n.º 2, págs. 338-342; 24 de febrero de 1978.

ANATOMICAL AND PHYSIOLOGICAL LOCALIZATION OF VISUAL AND INFRARED CELL LAYERS IN THE TECTUM OF PIT VIPERS. Leonard Kass, Michael S. Loop y Peter H. Hartline en *The Journal of Comparative Neurology*, vol. 182, n.º 4, págs. 811-820; 15 de diciembre de 1978.

CONNECTIONS OF THE TECTUM OF THE RATTLESNAKE *CROTALUS VIRIDIS:* AN HRP STUDY. Edward R. Gruberg, Earl Kicliter, Eric A. Newman, Leonard Kass y Peter H. Hartline en *The Journal of Comparative Neurology*, vol. 188, n.º 1, págs. 31-41; 1 de noviembre de 1979.

SPATIAL SHARPENING BY SECOND-ORDER TRIGEMINAL NEURONS IN CROTALINE INFRARED SYSTEM. L. R. Stanford y P. H. Hartline en *Brain Research*, vol. 185, n.º 1, págs. 115-123; 3 de marzo de 1980.

COCAINA

COCAINE 1980: PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL SEMINAR ON COCA AND COCAINE. Dirigido por F. Raul Jeri. Pacific Press; Lima, Perú, 1980.

DRUG ADDICTION AND DRUG ABUSE. Jerome H. Jaffe en *The Pharmacological Basis of Therapeutics*, dirigido por Alfred Goodman Gilman, Louis S. Goodman y Alfred Gilman. Macmillan Publishing Co., Inc., 1980.

LOCAL ANESTHETICS. J. Murdoch Ritchie y Nicholas M. Greene en *The Pharmacological Basis of Therapeutics*, dirigido por Alfred Goodman Gilman, Louis S. Goodman y Alfred Gilman. Macmillan Publishing Co., Inc., 1980.

COCA AND COCAINE-1981: A SPECIAL ISSUE. Dirigido por L. Rivier y J. G. Bruhn en *Journal of Ethnopharmacology*, vol. 3, n.os 2 y 3; marzo/mayo, 1981.

TEMAS METAMAGICOS

BIOQUÍMICA. Lubert Stryer. Reverté; Barcelona, 1977.

BIOLOGÍA MOLECULAR DEL GEN. James D. Watson. Fondo Educativo Interamericano, 1978.

BIOQUÍMICA. Albert L. Lehninger. Omega; Barcelona, 1980.

TALLER Y LABORATORIO

MODERN MAGNETISM. L. F. Bates Cambridge University Press, 1963.